

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PLINIO PEREIRA ROCHA

**UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE COCO BABAÇU NA LUBRIFICAÇÃO DE CAIXA DE
TRANSMISSÃO POR ENGRENAGENS PARA PROTÓTIPO BAJA SAE**

LONDRINA

2022

PLINIO PEREIRA ROCHA

**UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE COCO BABAÇU NA LUBRIFICAÇÃO DE CAIXA DE
TRANSMISSÃO POR ENGRENAGENS PARA PROTÓTIPO BAJA SAE**

Use of babaçu coconut oil in gearbox lubrication for BAJA SAE prototype

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a.Dr.^a. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PLINIO PEREIRA ROCHA

**UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE COCO BABAÇU NA LUBRIFICAÇÃO DE CAIXA DE
TRANSMISSÃO POR ENGRENAGENS PARA PROTÓTIPO BAJA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 29/novembro/2022

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela força para poder finalizar este trabalho de conclusão de curso.

À minha família, principalmente meus pais, Sergio Rocha e Irene Pereira, pelo incentivo, apoio e compreensão das ausências.

À minha vó, D. Nadir, e meu irmão, Sérgio Ricardo, que me guiam.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, por toda parceria e paciência comigo nestes anos, além dos conhecimentos passados.

Aos amigos da turma V, pelo companheirismo, em especial ao Basso, BIASON, Fernando, João, Julia, Leo, Lombarde, Marcello, Natalia, Queijo, Reinaldo e Rodolfo.

À Equipe Londribaja pelo desenvolvimento pessoal e profissional, e por todo conhecimento adquirido.

Aos amigos da Equipe Londribaja pelo comprometimento e parceria, ao longo das competições e da vida universitária.

Aos professores que tive durante o período de graduação.

À todas as pessoas que fizeram parte, direta ou indiretamente, nesta etapa da minha vida.

RESUMO

O uso de óleo como lubrificante em caixas de transmissão por engrenagens serve para reduzir o atrito e o desgaste nas superfícies dos dentes, além de proteger o mecanismo de corrosão. Comumente os óleos comerciais são de origem mineral ou sintético, o que tem gerado uma grande preocupação com relação ao impacto ambiental e saúde ocupacional. Alguns estudos apontam possibilidades do uso de óleos biodegradáveis para substituição dos atuais, onerando tais impactos. Diante disso o presente trabalho propõe-se a estudar um óleo lubrificante de base vegetal, a partir da extração do coco babaçu (*Attalea speciosa*). Para validação do lubrificante foram realizadas avaliações tribológicas comparativas entre o lubrificante comercial, de base sintética, e lubrificante de base vegetal do coco babaçu. Os ensaios foram realizados em uma bancada de testes tribológicos, um tribômetro linear recíproco, onde o corpo de prova foi submetido à diversos esforços mecânicos, a fim de simular o trabalho das engrenagens. Com relação aos desgastes no corpo de prova, foram avaliados os seguintes itens: rugosidade, peso do corpo de prova, área de desgaste e coeficiente de atrito. Com base nos resultados dos testes tribológicos realizado notou-se que o desgaste está diretamente ligado com a lubrificação e que o óleo de coco babaçu teve um coeficiente de atrito maior, comparado com o óleo comercial, porém tem potencial para ser utilizado com lubrificante.

Palavras-chave: ensaios tribológicos; desgaste; análises mecânicas; bancada de teste.

ABSTRACT

The use of oil as a lubricant in gearboxes serves to reduce friction and wear on tooth surfaces, in addition to protecting the mechanism from corrosion. Commercial oils are commonly of mineral or synthetic origin, which has generated great concern regarding the environmental impact and occupational health. Some studies point out possibilities of using biodegradable oils to replace the current ones, burdening such impacts. In view of this, the present work proposes to develop a vegetable based lubricating oil, from the extraction of babaçu coconut (*Attalea speciosa*). To validate the lubricant, comparative tribological evaluations were carried out between commercial lubricant, based on synthetic, and vegetable-based lubricant. The tests were carried out on a tribological test bench, a reciprocal linear tribometer, where the specimen was subjected to various mechanical stresses to simulate the work of the gears. Regarding wear on the specimen, the following items were evaluated: roughness, weight of the specimen, area of wear and coefficient of friction. Based on the results of the tribological tests carried out, it was noted that wear is directly linked to lubrication and that babaçu coconut oil had a higher friction coefficient compared to commercial oil but has the potential to be used as a lubricant.

Keywords: tribological tests; wear; mechanical analysis; test bench.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de extração do petróleo cru até a destilação	14
Figura 2 – Estrutura química de óleos vegetais	18
Figura 3 – Coco babaçu ao meio	19
Figura 4 – Gráfico do índice de viscosidade dos óleos A e B	21
Figura 5 – Fatores e efeitos de um Sistema tribológico	27
Figura 6 – Diferentes tipos de desgastes: Deslizamento (A), Fadiga, (B), Impacto (C), Erosão (D), Fretting (E), Cavitação (F).	28
Figura 7 – Mecanismos de desgaste	29
Figura 8 – Modelo 3D do tribômetro do tipo esfera sobre plano	30
Figura 9 – Óleo vegetal de coco babaçu utilizado nos testes	31
Figura 10 – Óleo comercial, SAE 75W90 utilizado nos testes	32
Figura 11 – Corpo de prova, aço 4340	32
Figura 12 – Esferas de aço cromo 52100	33
Figura 13 – Rugosímetro portátil SJ-210 MITUTOYO	34
Figura 14 – Balança de precisão ATY 224 SHIMADZU	34
Figura 15 – Teste em execução.....	37
Figura 16 – Gráfico do coeficiente de atrito pela distância utilizando óleo comercial.....	38
Figura 17 – Gráfico do coeficiente de atrito pela distância, utilizando óleo vegetal.....	39
Figura 18 – Comparação das variações de volume entre o óleo comercial e o vegetal.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de viscosidade dos óleos básicos	14
Tabela 2 – Classificação de óleos básicos lubrificantes (API)	15
Tabela 3 – Características físico-químicas do óleo babaçu	20
Tabela 4 – Dimensões e propriedades das amostras testadas no óleo comercial	35
Tabela 5 – Dimensões e propriedades das amostras testadas no óleo vegetal	35
Tabela 6 – Coeficientes de atrito do aço SAE 4340 utilizando óleo comercial ..	39
Tabela 7 – Coeficientes de atrito do aço SAE 4340 utilizando óleo vegetal	40
Tabela 8 – Massa e volume após testes com óleo comercial	41
Tabela 9 – Massa e volume após testes com óleo vegetal	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.1.1	Objetivos gerais.....	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
1.2	Justificativa	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Óleos lubrificantes	13
2.1.1	Óleos minerais.....	13
2.1.2	Óleos sintéticos	16
2.1.3	Óleos vegetais.....	17
<u>2.1.3.1</u>	<u>Óleo de coco babaçu</u>	<u>18</u>
2.2	Características dos óleos lubrificantes	20
2.2.1	Viscosidade	20
2.2.2	Índice de Viscosidade.....	21
2.2.3	Densidade	21
2.2.4	Ponto de fulgor	21
2.2.5	Ponto de fluidez.....	22
2.2.6	Resistência à oxidação.....	22
2.3	Classificação dos óleos lubrificantes	22
2.3.1	Classificação SAE	22
2.3.2	Classificação API.....	23
2.3.3	Classificação AGMA.....	23
2.4	Aditivos utilizados em óleos lubrificantes	23
2.4.1	Detergentes	23
2.4.2	Dispersantes	24
2.4.3	Antioxidante.....	24
2.4.4	Anticorrosivo.....	24
2.4.5	Antiespumante.....	24
2.4.6	Antidesgaste.....	24
2.4.7	Extrema-Pressão.....	25
2.4.8	Abaixador do ponto de fluidez	25
2.4.9	Melhoradores do índice de viscosidade	25
2.5	Métodos de lubrificação	25

2.5.1	Lubrificação por gravidade	25
2.5.2	Lubrificação por capilaridade.....	26
2.5.3	Lubrificação por salpico	26
2.5.4	Lubrificação por imersão	26
2.5.5	Lubrificação por sistema forçado.....	27
2.6	Tribologia	27
2.6.1	Desgaste	28
2.7	Tribômetro esfera sobre plano.....	29
2.8	Aço SAE 4340	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Materiais	31
3.2	Métodos.....	35
3.2.1	Preparação das amostras	35
3.2.2	Ensaio tribológico	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Coeficiente de atrito	38
4.2	Variação de massa e volume.....	41
5	CONCLUSÃO	43
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A - Benchmarking – Tipos de engrenagens e óleos lubrificantes utilizados pelas equipes BAJA SAE.	49

1 INTRODUÇÃO

O óleo lubrificante, em caixas de transmissão por engrenagens, tem como função principal reduzir o atrito entre duas superfícies. Esse atrito é reduzido devido a interposição de uma película de óleo entre as superfícies, substituindo o atrito sólido, por atrito fluido. Sendo este sempre menor que o atrito sólido. O lubrificante também é responsável por minimizar o desgaste da peça, uma vez que evita o contato sólido com sólido, o ruído e dissipar o calor gerado, além de proteger o sistema da corrosão. (PETRONAS, s.d).

Os mais utilizados no mercado são os óleos com base mineral, refinados do petróleo, por ter um baixo custo. Entretanto a pauta sobre sustentabilidade está muito forte nos últimos anos, com isso se tem buscado uma nova solução a fim de diminuir a dependência do petróleo, tendo como consequência uma diminuição no descarte do resíduo líquido no meio ambiente. (MATOS & POLITI, 2010).

A utilização de óleos com base vegetal é uma opção estudada no Brasil, devido à crescente demanda de lubrificante, fazendo com que a quantidade importada cresça também. (BELMIRO, 2018). O uso de óleo lubrificante de base vegetal traz, ao Brasil, não só uma alternativa para a importação dos óleos, mas também vários benefícios, como o desenvolvimento de tecnologias na área de lubrificantes de bases vegetais, como formulações adequadas e testes específicos, agregando valor, além da geração de empregos para a população da região de plantio e colheita, contendo o êxodo rural e distribuindo melhor a renda. (MATOS & POLITI, 2010).

No que se refere ao meio ambiente, óleos com base vegetal são recursos renováveis, com baixo nível de tóxicos e mais biodegradáveis em comparação com os de base mineral. Além disso, têm um alto índice de viscosidade, pouca volatilidade e elevado ponto de fulgor. (MATOS & POLITI, 2010).

Um dos óleos vegetais utilizados, e o que será estudado neste trabalho, é o de coco babaçu (*Orbignya oleífera*), fruto da palmeira babaçu (*Attalea ssp.*), nativa das regiões norte e nordeste do Brasil e que tem em seu interior as amêndoas de onde é extraído o óleo. Do fruto, de casca grossa, apenas 6 a 8% são amêndoas. Destas são extraídos de 65 a 68% de um óleo de cor branca a levemente amarelada. (DESTILARIA BAURU, 2020).

Para um óleo atuar como lubrificante é necessário estipular bem características físico-químicas, como: viscosidade, ponto de fulgor, ponto de fluidez,

índice de viscosidade etc. Porém para lubrificar engrenagens algumas características específicas são bem importantes, como: alta capacidade para suportar extrema pressão (EP), proteção contra corrosão e ferrugem, ser compatível com os materiais selantes da caixa e ter uma boa estabilidade térmica e oxidativa. (BIOLUB, 2018).

Uma das motivações para realização dessa pesquisa é a implementação do óleo com base vegetal, do óleo de babaçu, na caixa de transmissão, por engrenagens, do protótipo BAJA da Equipe Londribaja. O projeto Baja SAE foi criado nos Estados Unidos e teve sua primeira edição em 1976, no Brasil o projeto chegou em 1994 e sua primeira competição foi já no ano seguinte. Presente nas maiores universidades de engenharia, é um projeto que visa desenvolver um veículo *off-road*, desde sua concepção até a fabricação e realização de testes. O projeto tem como objetivo desenvolver, nos participantes, experiências práticas, aplicando todo conhecimento teórico aprendido. (SAE BRASIL, 2019)

1.1 Objetivo

Nesta seção é pontuado os objetivos do trabalho, mostrando os objetivos gerais e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a viabilidade da utilização do lubrificante com base vegetal, do óleo coco babaçu, em engrenagens de dentes retos, utilizadas na caixa de transmissão dos protótipos BAJA SAE, da Equipe Londribaja, e comparar seu desempenho com óleo comercial de base sintética.

1.1.2 Objetivos específicos

Desse modo os objetivos específicos do trabalho abrangem:

- ❖ Confeccionar o corpo de prova;
- ❖ Levantar ficha técnica comercial dos óleos lubrificantes existentes;
- ❖ Ensaio tribológico para analisar o comportamento de desgaste dos corpos de prova.

1.2 Justificativa

Por ser derivado do petróleo, os óleos mineral e sintético têm um impacto ambiental enorme ao ser descartado, já que não são biodegradáveis. Para reduzir esse impacto busca-se por fontes sustentáveis e renováveis para produção de lubrificantes, substituindo as fontes atuais que como dito anteriormente causam danos ao meio ambiente. Esta substituição se torna muito atrativa, já que os óleos de base vegetal são providos de fontes renováveis, biodegradáveis, bioestáveis, não são tóxicos e apresentam baixo custo, em sua grande maioria. (CARDOSO, 2012)

A palmeira babaçu é uma espécie do cerrado, encontrada em uma área que cobre cerca de 196 mil km² do Brasil, concentrada nos estados do Maranhão, Tocantins e Piauí. Ela tem uma característica interessante, pois é aproveitado tudo de seu pé, desde as folhas que servem na armação de cobertas para casa, como também servem de alimentação para os animais na época de seca, até as amêndoas de onde é produzido o óleo vegetal. (CERRATINGA, 2013). Pela extração das amêndoas ser tradicionalmente caseira, feita pelas populações locais e pelas “quebradeiras de coco”, o uso de seu óleo como óleo base de lubrificantes faz com que movimente mais empregos e o comercio da região onde é extraído.

Assim como impacta o meio ambiente, o óleo mineral também impacta a saúde ocupacional de quem o manuseia. Um óleo mineral novo já tem um certo grau de perigo, pelo fato de ser proveniente do petróleo e de alguns aditivos serem tóxicos. Já o óleo mineral usado ou contaminado, além de ter a carga original de perigo, fica ainda mais perigoso devido a degradação dos componentes presentes nele, gerando compostos prejudiciais à saúde, acarretando doenças graves. (APROMAC, 2007). Devido ao fato de o óleo de base vegetal não ser tóxico, seu uso é visto como uma boa opção para reduzir os riscos à saúde de quem manuseia óleos lubrificantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A tribologia é a ciência que estuda o atrito, um aspecto bastante importante na hora de escolher o óleo lubrificante. A lubrificação é um diferencial no poder de competitividade, sendo uma fonte de ganhos, ocasionando um melhor desempenho dos equipamentos e um menor desgaste. Neste capítulo são apresentados os tipos de óleos lubrificantes, suas características, classificações e os aditivos existentes. Também será apresentado a importância da tribologia e os tipos de tribômetros existentes.

2.1 Óleos lubrificantes

Os óleos são os lubrificantes mais utilizados, pois têm uma grande facilidade em penetrar melhor nas partes móveis através da ação hidráulica, eles separam as superfícies com sua película e agem como refrigerantes. (PETRONAS, s.d). Os óleos lubrificantes são produzidos através da mistura de um óleo básico e aditivos. Eles podem ter suas bases de origem mineral, sintética e vegetal.

2.1.1 Óleos minerais

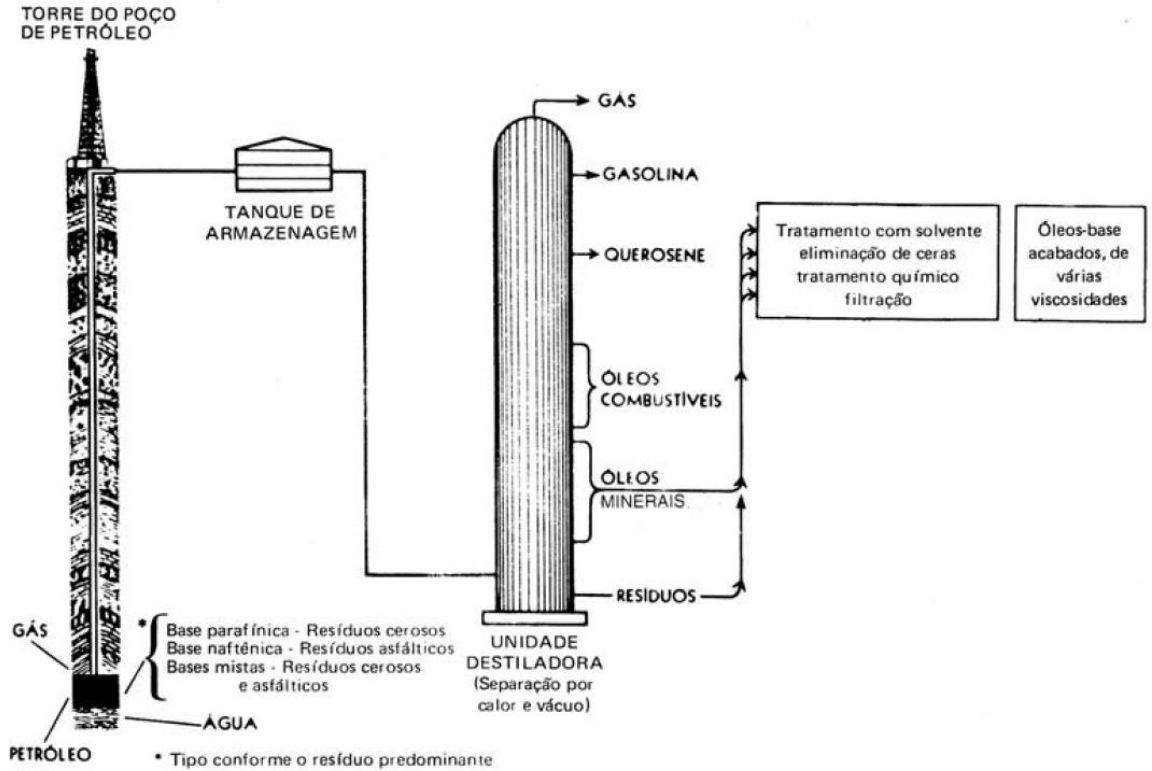
O petróleo extraído é chamado de óleo cru ou bruto e é classificado, conforme o tipo de resíduo deixado no refino, em parafínico e naftênico e aromáticos. Este último não é adequado para utilizar como base para lubrificantes. (ZAMBONI, 2008). Os óleos minerais são produzidos a partir do refino do petróleo cru, com isso, também são formados pelos elementos químicos carbono e hidrogênio, na forma de hidrocarbonetos. (PETRONAS, s.d).

O método mais comum de processar o óleo cru é através da destilação fracionada, onde os produtos mais voláteis, não lubrificantes, são separados das frações residuais mais densas. Neste processo os óleos lubrificantes passam por uma refinação a fim de produzir óleos de alta qualidade. A refinação é feita por meio de solventes em contracorrentes em uma coluna extratora, dando uma melhor qualidade no óleo. Na refinação é extraído o excesso de parafina, hidrocarbonetos instáveis, resinas e outros elementos indesejáveis. (MOBIL, s.d).

Por meio da destilação, repetidos processos de vaporização e condensação, se separa as frações de diferentes volatilidades, tendo assim um uso para cada. A fração destinada a produção do óleo lubrificante tem uma composição aproximada de

26 a 38 carbonos. (FILHO *et al.*,2016). A Figura 1 ilustra a refinação e destilação do petróleo cru.

Figura 1 – Processo de extração do petróleo cru até a destilação



Fonte: Mobil, s.d.

Os óleos classificados como parafínicos e naftênicos, têm propriedades típicas que os tornam aptos para certas aplicações e não aptos em outras aplicações como lubrificantes. Pelo fato dos diversos processos de refino, que podem modificar as características dos óleos, não há como dizer qual dos dois óleos é o melhor. Na Tabela 1 é possível ver a diferença do índice de viscosidade ocasionado pela base utilizada nos lubrificantes.

Tabela 1 – Índices de viscosidade dos óleos básicos

Base Lubrificante	Índice de Viscosidade
Óleos minerais naftênicos	50 – 60
Óleos minerais parafínicos	80 – 120
Óleos VHVI (Grupo III)	120 – 150
Óleos de GTL	120 – 144
PAO (Polialfaolefinas)	120 – 170

Fonte: Adaptado de Zamboni, 2008

A fim de manter uma padronização nas especificações dos óleos básicos nas refinarias mundiais, o Instituto de Petróleo Americano (API) e a Associação Técnica da Indústria Europeia de Lubrificantes (ATIEL) aderiram um sistema para classificá-los, fundamentada em três parâmetros: Teor de Enxofre, Teor de Saturados e o Índice de Viscosidade. (ZAMBONI, 2008). Essa classificação foi realizada para atender às necessidades de qualidade que a indústria automobilística tem e pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação de óleos básicos lubrificantes (API)

	Teor de Saturados (% peso)	Teor de Enxofre (% peso)	Índice de Viscosidade
Grupo I	< ou = 90	> ou = 0,03	80 – 119
Grupo II	> 90	< 0,03	80 – 119
Grupo III	> 90	< 0,03	> ou = 120
Grupo IV	PAOs (Polialfaolefinas)		
Grupo V	ésteres sintéticos / óleos naftênicos / outros		
Grupo VI	PIOs (Poli-interval Olefinas)		

Fonte: Adaptado de Zamboni, 2008

Como visto na Tabela 2, a partir desses parâmetros foram criados seis grupos, sendo os três primeiros explicados neste tópico, pois são de bases minerais e os três últimos explicados no próximo tópico, pois são de bases sintéticas.

Grupo I – Neste grupo está presente os óleos minerais menos refinados. Normalmente são refinados utilizando solventes e são os mais utilizados como óleos básicos para lubrificantes automotivos. São compostos por uma mistura de diferentes cadeias de hidrocarboneto não uniforme. (INOVAÇÃO, 2018).

Grupo II – São óleos básicos produzidos através da hidrefinação, tendo menos impureza e desempenho melhor que o anterior. Isto resulta em um ponto de fluidez e viscosidade regular a baixas temperaturas, além de ter um desempenho bom nas características como volatilidade, estabilidade a oxidação e ponto de fulgor. Por essas últimas características são bastante utilizados na América do Norte. (INOVAÇÃO, 2018).

Grupo III – Estes óleos básicos, são os mais refinados dentre todos os óleos minerais. Mesmo não sendo sintético, têm um desempenho muito alto e é estável em grande parte de suas propriedades. Para ter um óleo com essa qualidade é preciso passar pelo processo de hidroprocessamento e refinação. Servem também para fabricar óleos lubrificantes sintéticos. (INOVAÇÃO, 2018).

2.1.2 Óleos sintéticos

Os óleos lubrificantes sintéticos são os quais têm seu óleo básico sintetizado em laboratório. São obtidos através de processos especiais, usando reagentes derivados do petróleo, em sua maioria, tendo como produto um óleo básico contendo apenas o desejado, sem contaminantes. Assim, se torna um produto com uma alta confiabilidade e desempenho superior aos óleos minerais. (SILVA, 2011)

Se desenvolveu bastante durante os anos 30, época de guerra, onde era utilizado para fins militares e posteriormente industriais. (SOARES, 2013). A partir desse período sua tecnologia vem se desenvolvendo, aumentando sua vida útil e suportando condições extremas.

Ao compará-lo com o óleo básico mineral nota-se diversas vantagens e desvantagens ao utilizá-lo como lubrificante. As principais vantagens são em relação às suas características físico-químicas, como maior resistência a elevadas temperaturas e suas variações, devido ao seu alto índice de viscosidade, maior vida útil, boa estabilidade química, alta resistência a oxidação e degradação. O que pesa contra a utilização deste óleo básico é seu custo mais elevado, em comparação ao de base mineral, e incompatibilidade de se misturar com alguns aditivos na produção do óleo lubrificante, tornando necessário avaliar o custo-benefício antes de fabricá-lo. (CARRERITO & BELMIRO, 2008).

Hoje em dia é possível encontrar muitas bases sintéticas no mercado e sua escolha é feita dependendo da aplicação e quais serão os aditivos que irão se misturar. Essas bases são encontradas nos Grupos IV, V e VI, citados no tópico anterior.

Grupo IV – Grupo formado pelas polialfaolefinas (PAOs). São básicos quimicamente processados, possuindo um baixo ponto de fluidez, alto índice de viscosidade, ótima estabilidade térmica e resistência a oxidação. (INOVAÇÃO, 2018). Têm uma composição química estável e cadeias moleculares uniformes. (ZAMBONI, 2008).

Grupo V – Apresenta os óleos com bases especiais, como ésteres sintéticos e poliolesteres, além do básico naftênicos. São bastantes utilizados no desenvolvimento de aditivos e em processos petroquímicos. (ZAMBONI, 2008). Neste grupo são encontrados os óleos básicos utilizados na lubrificação aeronáutica. (INOVAÇÃO, 2018).

Grupo VI – Este grupo abriga, exclusivamente, o Poli-interval Olefina, um tipo de oligômero de olefina produzido na Europa. O grupo foi criado para simplificar os processos de aprovação. (ZAMBONI, 2008).

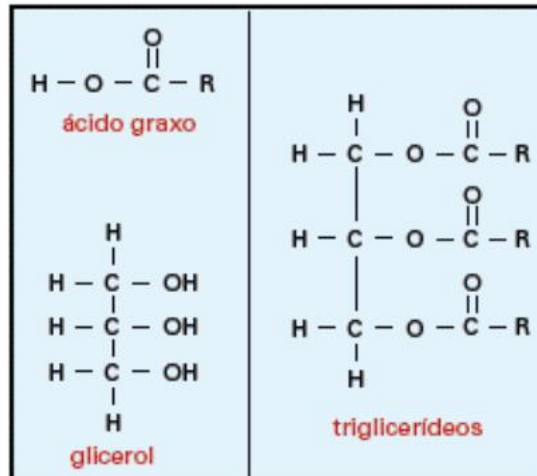
2.1.3 Óleos vegetais

Além de ser uma opção na substituição dos óleos derivados do petróleo, por ser biodegradável e menos tóxico, os óleos de base vegetal apresentam algumas características melhores que os comerciais, como boa lubricidade, baixa volatilidade e um índice de viscosidade alto. (DELGADO *et al.*, 2017).

Sua utilização na indústria vem sendo estudada, desde 1900, quando Rudolph Diesel utilizou óleo de amendoim em seu motor, na exposição universal, em Paris. Nacionalmente, os primeiros estudos datados são de meados do século 20. Em 1975 surgiu o “Pro Óleo – Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos”, programa do governo federal que visava substituir o óleo diesel por óleos vegetais. (MATOS, 2011).

Podem ser extraídos das sementes de mamona, girassol, soja, babaçu, entre outros. É composto basicamente de produtos de condensação entre glicerol e ácidos graxos, os triglicerídeos (90% a 98%), mas também há a presença de glicerídeos, como fosfatídeos, esteroides etc. (MATOS & POLITI, 2010). Na Figura 2 observa-se a estrutura química dos produtos que compõem os óleos vegetais.

Figura 2 – Estrutura química de óleos vegetais



Fonte: Matos & Politi, 2010

Apesar de ter boas características, os básicos vegetais têm certas limitações relacionadas a baixa estabilidade térmica e oxidativa, tornando o óleo mais viscoso e ácido, e alto ponto de fluidez a baixas temperaturas. Esses fatores são ocasionados pois ao longo das cadeias carbônicas não há saturações. (MATOS & POLITI, 2010). Porém essas limitações podem ser vencidas utilizando os devidos aditivos na produção do lubrificante.

2.1.3.1 Óleo de coco babaçu

Sua obtenção, feita da forma tradicional, começa na colheita dos frutos, que se inicia assim que os frutos maduros vão caindo no chão. A colheita dos frutos que não caíram é utilizando vara para derrubar dos cachos ou arremessando um pedaço de pau, chamada técnica de rebolo. (CARRAZZA, SILVA & ÁVILA, 2012).

Posteriormente é necessário a quebra dos cocos para retirar as amêndoas, trabalho realizado no próprio babaçual e realizado, principalmente, pelas mulheres “quebradeiras”. Em seguidas as amêndoas são trituradas, cozidas e prensadas para que possa extrair seu óleo. (CARRAZZA, SILVA & ÁVILA, 2012). A Figura 3 mostra o coco babaçu cortado ao meio, mostrando as amêndoas que são utilizadas para extrair o óleo.

Figura 3 – Coco babaçu ao meio



Fonte: Barbosa, 2012

Extraído das amêndoas do coco babaçu, o óleo de babaçu é composto por vários ácidos graxos, como: caprílico 4%, cáprico 5%, linoléico 5%, esteárico 7%, palmítico 10%, oléico 17%, mirístico 18% e ácido láurico 45%. (BARBOSA, 2012).

Por ser rico em ácido láurico, fazendo ser muito estável a altas temperaturas, o óleo de babaçu é consumido, como insumo, na indústria alimentícia, principalmente na região Nordeste, para produção de óleos alimentares e manteigas. (ECYCLE, s.d) O óleo de babaçu, também, é utilizado na indústria de cosméticos, na produção de cremes hidratantes, pomadas para acnes, entre outros. (ECYCLE, s.d). Outra aplicação é nos segmentos de higiene e limpeza, devido ao alto nível de acidez, que implica na fabricação de sabões e sabonetes. (EMBRAPA, 2018). Além de ir para as indústrias, o óleo de babaçu é, comumente, utilizado na alimentação das comunidades da região do Cerrado. (CERRATINGA, 2013).

Como as amêndoas têm um teor elevado de lipídios, o babaçu também é considerado um grande potencial na produção de óleos básicos vegetais. (BARBOSA, 2012).

Na Tabela 3 é possível ver alguns dados característicos do óleo bruto de babaçu.

Tabela 3 – Características físico-químicas do óleo babaçu

Características	Unidade	Apresentação
Aparência (25°C)	---	Pastoso
Cor	---	Amarelo translúcido
Odor	---	Característico
Índice de acidez	mg NaOH/g	< 7,5
Índice de peróxido	10 meq O ₂ /kg	< 10
Índice de iodo	gl ₂ /100g	14 – 17
Índice de saponificação	mgKOH/g	240 – 250
Densidade	25°C g/ml	0,903 – 0,924
Índice de refração (40°C)	---	1.448 – 1.450
Matéria insaponificável (bioativos)	%	< 1
Ponto de fusão	C°	22 – 26

Fonte: Adaptado de Amazonoil, s.d

2.2 Características dos óleos lubrificantes

Os óleos lubrificantes têm suas características físico-químicas implicando assim na sua aplicação, local onde se aplicará, tempo de uso, entre outros. As principais características, quanto ao uso em caixas de engrenagens, estão relacionadas a seguir.

2.2.1 Viscosidade

Propriedade principal dos lubrificantes, a viscosidade é a resistência ao escoamento que o óleo causa. O óleo lubrificante deve ter uma viscosidade suficiente para manter a película entre as superfícies, não podendo ser pouco viscoso, fazendo com que não forme a película, nem muito viscoso, oferecendo uma resistência excessiva. (SENAI, 1997).

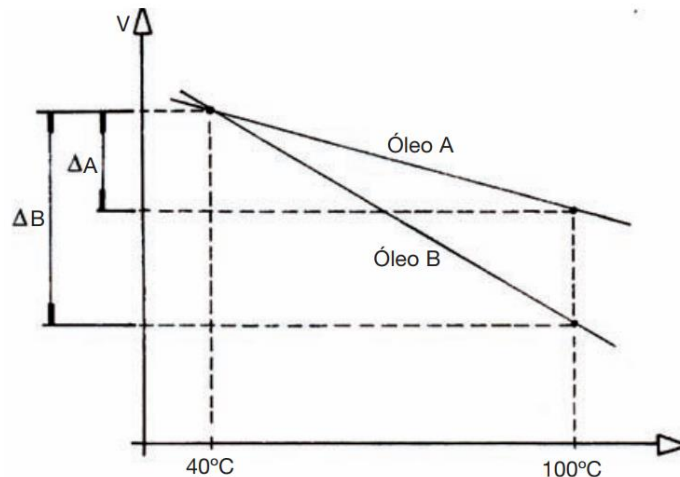
A viscosidade é inversamente proporcional a temperatura, ou seja, quanto maior sua temperatura menor sua viscosidade, pois com o aumento da temperatura as moléculas do fluido se agitam mais, distanciando uma das outras, tornando-se, assim, menos resistentes ao cisalhamento. (MOBIL, s.d).

2.2.2 Índice de Viscosidade

Número adimensional que expressa a taxa de variação da viscosidade conforme varia a temperatura. Quanto maior o índice de viscosidade do lubrificante, menor será sua variação de viscosidade. (PETRONAS, s.d).

A Figura 4 demonstra dois óleos, com diferentes índices de viscosidade.

Figura 4 – Gráfico do índice de viscosidade dos óleos A e B



Fonte: Petronas, s.d

Conforme visto na Figura 4, o óleo A sofre uma menor variação de viscosidade quando a temperatura é elevada, tendo assim um índice de viscosidade maior que o óleo B.

2.2.3 Densidade

A densidade é a relação entre a massa e o volume do produto. Ela é medida a uma determinada temperatura, 60°F / 60°F, no sistema inglês e 20°C / 20°C no sistema métrico. (SENAI, 1997).

Apesar de pouco significado quanto a qualidade do óleo, ela é bastante utilizada para converter litros em quilos ou vice-versa. É bastante importante para verificar se o lubrificante sofreu contaminação ou deterioração. (APROMAC, 2007).

2.2.4 Ponto de fulgor

Temperatura mínima na qual, quando o óleo aquecido, desprende vapores do óleo que inflamam ao contato com uma chama. Esta propriedade é muito utilizada quando o lubrificante trabalhará em altas temperaturas. (ESSEL, s.d).

Óleos com ponto de fulgor abaixo de 150°C não são indicados para lubrificação, pois dá sinais de presença de compostos voláteis e inflamáveis no óleo. (SEDUC, 2011).

2.2.5 Ponto de fluidez

Conhecido também como ponto de gota, é a menor temperatura que o óleo consegue fluir livremente. Propriedade muito importante caso o lubrificante seja utilizado em locais que tenham uma temperatura baixa. (JANSEN, 2005).

2.2.6 Resistência à oxidação

Esta propriedade é primordial para avaliar sua qualidade e desempenho. Indispensável para óleos utilizados em elevadas temperaturas e/ou presença de ar.

Os óleos básicos vegetais têm baixa resistência, neste caso a resistência é alcançada com a adição de aditivos. (SOARES, 2013).

2.3 Classificação dos óleos lubrificantes

Os óleos lubrificantes são classificados por órgãos internacionais, a fim de padronizá-los, tornando mais fácil a comparação de um com outro. As classificações mais utilizadas comercialmente são SAE (*Society Automotive of Engineers*) e API (*American Petroleum Institute*). (CYRINO, 2018).

2.3.1 Classificação SAE

Determinado pela SAE, os óleos são classificados pela sua viscosidade, indicada por meio de um número. Quanto maior o número, no qual o óleo foi classificado, maior sua viscosidade.

Nesta classificação os lubrificantes são divididos em dois grupos, os óleos monoviscosos, onde engloba as categoriais de altas temperaturas (“verão”) e baixas temperaturas (“inverno”), e os óleos multiviscosos (“ano todo”), que são a combinação dos óleos de alta e baixa temperatura.

Os óleos para baixas temperaturas são indicados de 0W a 25W, já os de temperaturas altas tem indicadores de 20 a 60. Os multiviscosos têm os indicadores duplos, fazendo referência aos monoviscosos, como por exemplo SAE 10W-30. (APROMAC, 2007).

2.3.2 Classificação API

Criado pelo API é baseada na aplicação e desempenho dos óleos. São classificados por duas letras. A primeira letra indica a aplicação do lubrificante, sendo, a letra C (*Compression Ignition ou Commercial*) óleos para motores diesel, a letra S (*Spark Ignition ou Service*) óleos para motores a combustão interna e as letras GL (*Gear Lubrificant*) óleos para engrenagens. (CYRINO, 2018).

A segunda letra indica o desempenho dos óleos, seguindo a ordem alfabética, ou seja, quanto mais próximo do A, menor seu desempenho. Nos dias atuais um óleo com alto desempenho é classificado com a letra N, por exemplo, API SN. (APROMAC, 2007).

2.3.3 Classificação AGMA

A classificação é feita pela AGMA (*American Gears Manufacturers Association*), classifica, exclusivamente, os óleos lubrificantes que são utilizados em engrenagens abertas ou fechadas. Ela leva em consideração tanto a viscosidade do fluido quanto sua aditivação (TEXACO, 2005).

Ela classifica os óleos lubrificantes como:

- R&O (Inibidores de ferrugem e corrosão);
- EP (Antidesgaste / Extrema pressão);
- CP (Óleos compostos);
- R (Residuais – utilizados em engrenagens abertas);
- S (Sintéticos).

2.4 Aditivos utilizados em óleos lubrificantes

Substâncias químicas utilizadas na produção do óleo lubrificante, têm como função adicionar ou melhorar características físico-químicas, tornando o óleo mais equilibrado. Os aditivos são selecionados conforme compatibilidade com os óleos básicos e influenciam na aplicação final do lubrificante. (MOBIL, s.d). A seguir serão apresentados os principais aditivos utilizados.

2.4.1 Detergentes

Bastante utilizados em motores de combustão interna, têm a propriedade de manter limpas as superfícies metálicas, impedindo a formação de gomas e lascas.

Também têm basicidade para neutralizar os ácidos formados durante a combustão. (PETRONAS, s.d). Algumas naturezas químicas são os sulfonatos, fosfonatos e fenolatos. (MOBIL, s.d).

2.4.2 Dispersantes

Também muito utilizado em motores de combustão, pois impedem a decantação dos produtos de combustão (fuligem) e oxidação (borra) nas superfícies metálicas, deixando-os dispersos e suspensos, ficando retidos nos filtros ou removidos facilmente na troca do óleo. (PETRONAS, s.d).

2.4.3 Antioxidante

Este aditivo aumenta a resistência à oxidação do óleo. Retardam a oxidação dos óleos lubrificantes, que tendem a reagir com o oxigênio presente no ar, evitando a formação de ácidos, assim aumenta a vida útil do óleo. (SENAI, 1997).

2.4.4 Anticorrosivo

Os anticorrosivos neutralizam os ácidos formados na oxidação, protegendo as superfícies metálicas da corrosão, não permitindo que os ácidos ataquem. Também protegem as superfícies contra a umidade e outros contaminantes. (APROMAC, 2007).

2.4.5 Antiespumante

Tem a característica de evitar que espumas, bolhas, sejam formadas, o mais rápido possível, quando os óleos estiverem agitados. Isso faz com que os lubrificantes não percam suas propriedades e mantenham sua eficiência. (SENAI, 1997).

2.4.6 Antidesgaste

São utilizados em lubrificantes que sofrerão uma grande carga, como por exemplo engrenagens, pois quando houver um rompimento na película de óleos, eles reagem com o metal e formam uma camada protetora de óleo nas superfícies metálicas, evitando o contato dos metais e reduzindo o desgaste. (PETRONAS, s.d).

A formação deste filme ocorre a temperaturas pontuais de até 300°C.

2.4.7 Extrema-Pressão

Semelhantes aos aditivos de antidesgastes, os de extrema-pressão têm uma característica mais agressiva. Tem a mesma finalidade do antidesgaste, formação da camada protetora quando rompe a película do lubrificante, porém suportam cargas e temperaturas mais elevadas. Estes aditivos reagem com as superfícies metálicas sob pressão superficial muito elevada. (SENAI, 1997).

Esta reação acontece a temperaturas pontuais elevadas, por volta de 500°C.

2.4.8 Abaixador do ponto de fluidez

Indicado para óleos que operam em baixas temperaturas e para óleos vegetais, este aditivo aumenta as propriedades de fluidez do óleo, envolvendo os cristais de parafina formados a baixa temperatura, não deixando que cresçam e agrupem, o que impossibilitaria a circulação do lubrificante. (SENAI, 1997).

2.4.9 Melhoradores do índice de viscosidade

São aditivos químicos, polímeros, de estrutura linear, que têm como finalidade reduzir a variação da viscosidade quando a temperatura aumenta.

As moléculas dos polímeros funcionam distendendo-se em seus invólucros, quando em alta temperatura, expandindo, isso dificulta o escoamento, aumentando assim sua viscosidade. Em baixas temperaturas as moléculas ficam contraídas. (SENAI, 1997).

2.5 Métodos de lubrificação

Para que as partes tenham uma lubrificação eficientemente, algumas condições devem ser atendidas, como: o lubrificante correto, quantidade exata, local adequado e custo do sistema de lubrificação. (JANSEN, 2005).

2.5.1 Lubrificação por gravidade

Na lubrificação por gravidade também há três modelos de aplicação: o manual, copo com agulha ou vareta e copo com conta gotas. O manual, que é feito através de almotolias, porém não é muito eficiente já que não faz uma lubrificação homogênea, podendo adicionar mais ou menos lubrificante. O método de copo com vareta ou agulha é um dispositivo que tem agulha que atravessa o furo, por onde sair

o óleo, e fica apoiada sobre o eixo. Com o eixo girando a agulha é movimentada, isso permite o fluxo do lubrificante para o eixo, que continua sendo lubrificado enquanto dura a rotação dele. O sistema de lubrificação por copo conta gotas tem uma vantagem, em relação aos outros, pois há a regulação da quantidade de óleo lubrificante que será aplicado sobre a superfície metálica. (JANSEN, 2005).

2.5.2 Lubrificação por capilaridade

Na lubrificação por capilaridade existe dois sistemas, a lubrificação copo com mecha e a lubrificação por estopa ou almofada. Na lubrificação copo com mecha, o fluxo do óleo é através de um pavio que fica encharcado de lubrificante. A fluidez do lubrificante depende de sua viscosidade, temperatura, além do tamanho e do traçado do pavio. Já a lubrificação por estopa ou almofada, a estopa é encharcada de óleo e colocada em contato com a parte inferior do eixo. Por ação capilar, o lubrificante flui pela estopa em direção a peça. (JANSEN, 2005).

2.5.3 Lubrificação por salpico

O lubrificante fica depositado em um recipiente e lubrifica as superfícies quando as partes móveis, quando movimentadas, em contato com o óleo, borrifam o lubrificante nas demais peças, como mancais e engrenagens. É um sistema bastante econômico e eficiente. (JANSEN, 2005).

2.5.4 Lubrificação por imersão

Neste sistema as partes a serem lubrificadas mergulham, total ou parcialmente, no lubrificante que está contido em um recipiente adequado. O excesso do óleo é distribuído às demais peças por meio das ranhuras. O óleo deve ser constantemente verificado para corrigir seu nível, caso precise, pois, o óleo além de lubrificar, resfria as peças. (SENAI, 1997).

O banho de óleo é utilizado em mancais axiais de rolamentos e caixas de engrenagens, onde as partes inferiores das engrenagens não devem ficar mergulhadas mais do que um terço da altura, pois pode sofrer perda de potência e formar espumas. (JANSEN, 2005).

2.5.5 Lubrificação por sistema forçado

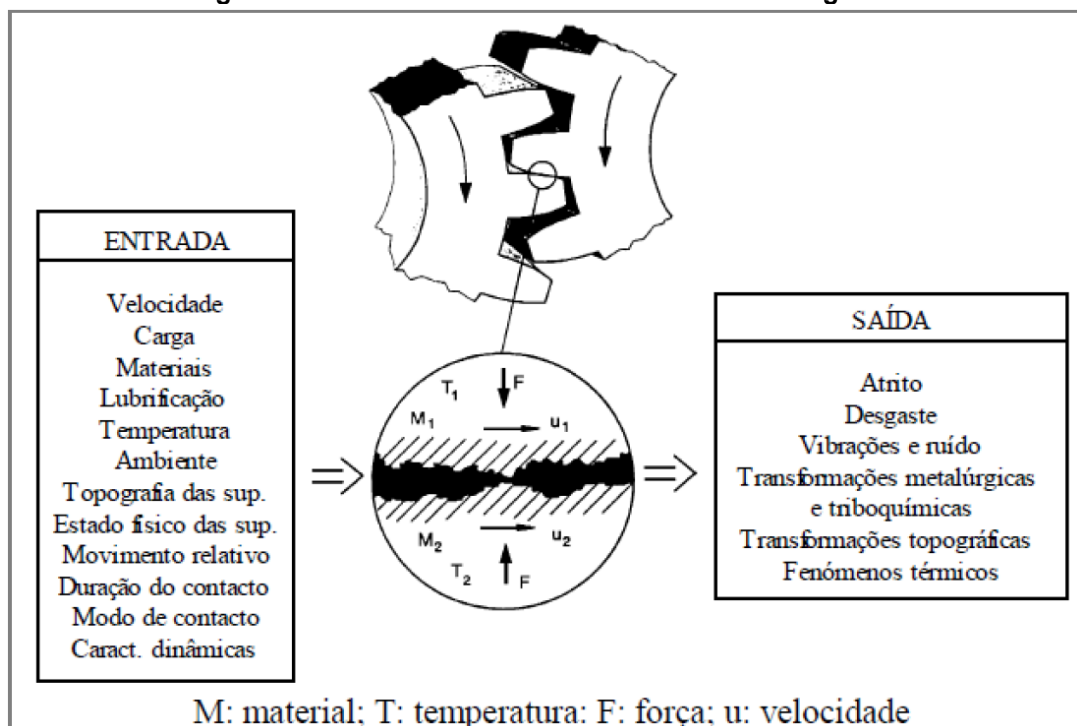
Neste método o óleo é bombeado do reservatório para as partes que serão lubrificadas. Se o óleo que lubrificou não retorna ao reservatório, a lubrificação é chamada de forçada por perda. Quando há o retorno do óleo, é chamado de lubrificação por circulação. (SENAI, 1997).

2.6 Tribologia

A tribologia é a ciência que estuda as interferências relativas ao contato de superfícies em movimento, que são: o atrito, desgaste e a lubrificação. O atrito é a resistência ao movimento relativo, quando as superfícies estão em contato, assim para que o movimento ocorra é necessário aplicar uma força maior, sobre uma das superfícies, vencendo a força de atrito. (HUTCHINGS, 1992).

O comportamento tribológico dos materiais é motivado por diversos fatores externos, como por exemplo: carga, lubrificação, rugosidade superficial, movimento relativo, entre outros que podem ser observados na Figura 5. Como cada tipo de material tem suas características distintas, seus estudos tribológicos devem ser feitos de modo compatível ao material. (PINTO, 2000).

Figura 5 – Fatores e efeitos de um Sistema tribológico



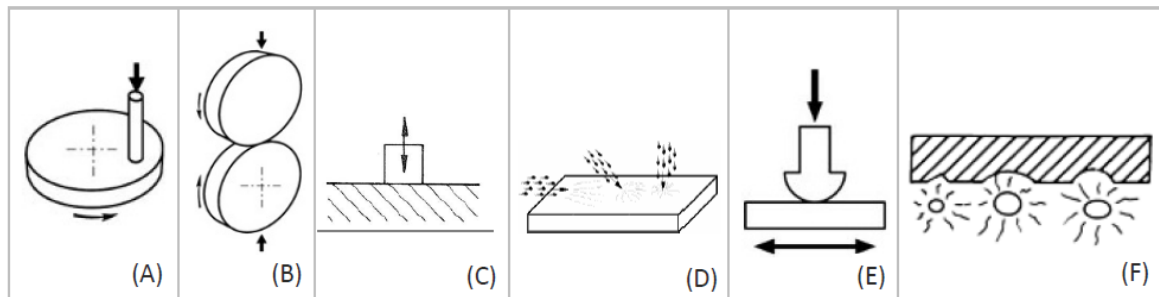
Fonte: Pinto, 2000

2.6.1 Desgaste

O desgaste é a perda de material, em uma determinada área, ocasionada pelo movimento relativo sobre esta superfície, seu principal causador é o atrito. (ASTM G40, 2017).

Os tipos de desgastes mais frequentes são: por deslizamento, por fadiga de contato, por impacto, por erosão, o *fretting* e a cavitação. (HOLMBERG, 2009). Na Figura 6 pode-se observar os tipos.

Figura 6 – Diferentes tipos de desgastes: Deslizamento (A), Fadiga, (B), Impacto (C), Erosão (D), *Fretting* (E), Cavitação (F).



Fonte: Holmberg, 2009

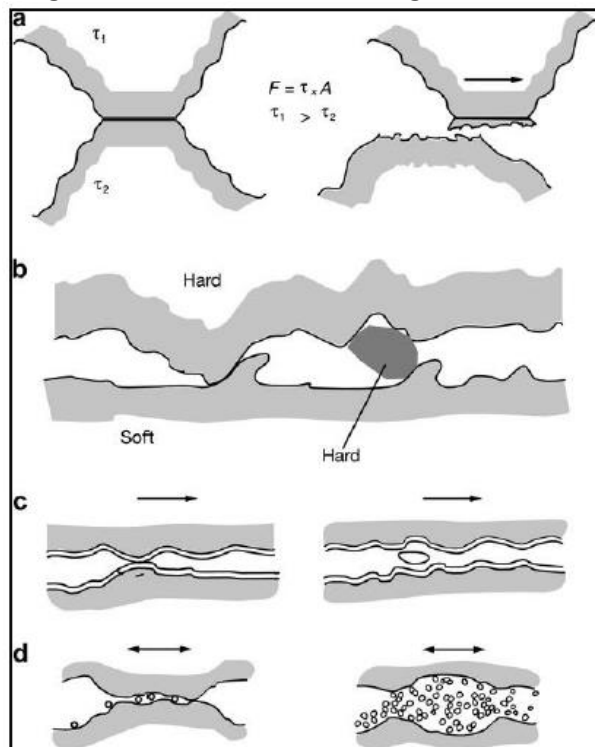
O desgaste é classificado em quatro mecanismos, como visto a seguir e na Figura 7.

- a) Adesivo: este desgaste ocorre quando duas superfícies deslizam em contato, provocando deformação plástica, adesão, e a formação de partículas localizadas. Com o movimento relativo das superfícies as partículas podem ser liberadas e tem a transferência de material de uma superfície para outra. (SANTOS, 2019).
- b) Abrasivo: é o desgaste que acontece quando uma das superfícies tem uma dureza maior que a outra, ou quando há a presença de outro corpo sólido entre as partes, conhecida como abrasão a três corpos. A superfície mais dura é pressionada contra a mais macia, resultando no arranque de material e originando os sulcos. (SANTOS, 2019).
- c) Fadiga: tem como característica formação de fissuras e posterior quebra do material, devido as cargas cíclicas e repetidas. Com as repetidas aplicações das altas pressões de contato, começa a provar trincas superficiais ou internas, que ao passar do tempo alastram até a superfície,

tendo como consequência a liberação de partículas para abrasão a três corpos. (SANTOS, 2019).

- d) Químico: ocorre devido as reações químicas que são prejudiciais ao contato. As reações químicas deixam as superfícies de contato mais frágeis. O processo químico provoca corrosão nas superfícies. (SANTOS, 2019).

Figura 7 – Mecanismos de desgaste

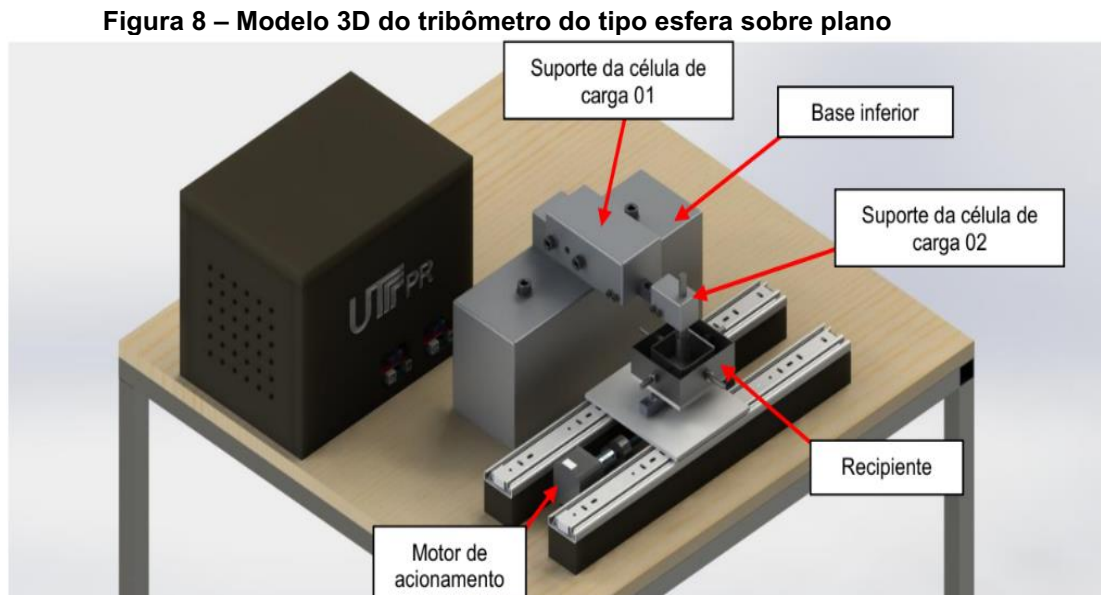


Fonte: Santos, 2019

2.7 Tribômetro esfera sobre plano

O tribômetro do tipo esfera sobre plano é modelo de equipamento que tem como característica o deslizamento da esfera sobre o corpo de prova plano em um movimento linear, apenas na direção horizontal, percorrendo um curso de duplo sentido, como é visto na Figura 8. (ASTM G133-05, 2016). Este modelo de tribômetro tem como vantagem o reposicionamento por diversas vezes em ensaios distintos sempre com uma nova superfície para poder avaliar o desgaste. Por outro lado, sua desvantagem é o aumento da área de contato ao decorrer do ensaio. (RANDALL, 2012).

O ensaio deste tribômetro é regido pela norma ASTM G133, pode ser feito a seco ou lubrificado, o tipo de desgaste ao decorrer do ensaio é o desgaste por deslizamento e seu mecanismo de desgaste pode ser tanto adesivo quanto tribo-oxidativo. (BLAU, 2008).



Fonte: Viegura, 2022

2.8 Aço SAE 4340

O aço SAE 4340 é classificado com um aço baixa liga, pois os elementos de liga compõem menos de 8% de seu peso, e de médio carbono com 0,4% p.p. Os elementos de liga presentes são: Cromo (0,7% – 0,9%), Molibdênio (0,6% – 0,8%) e Níquel (1,65% – 2%), tendo uma alta resistência, tenacidade e ductilidade. Devido as suas características e por ser um aço de fácil usinabilidade, o aço SAE 4340 é muito utilizado na fabricação de peças utilizadas na indústria. As principais peças são: eixos, componentes estruturais, engrenagens, luvas, virabrequins, entre outros. (SOUZA, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

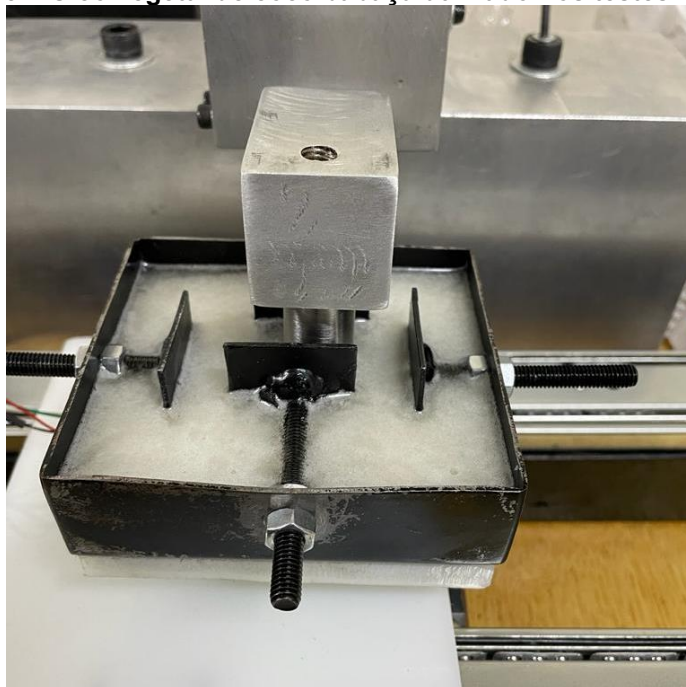
Nesta seção será apresentado os testes realizados, junto com seus materiais necessários, além do tribômetro utilizado.

Os corpos de prova foram testados, tendo como base a norma ASTM G133 (2016), posteriormente, foram analisados, a fim de avaliar os desgastes sofridos.

3.1 Materiais

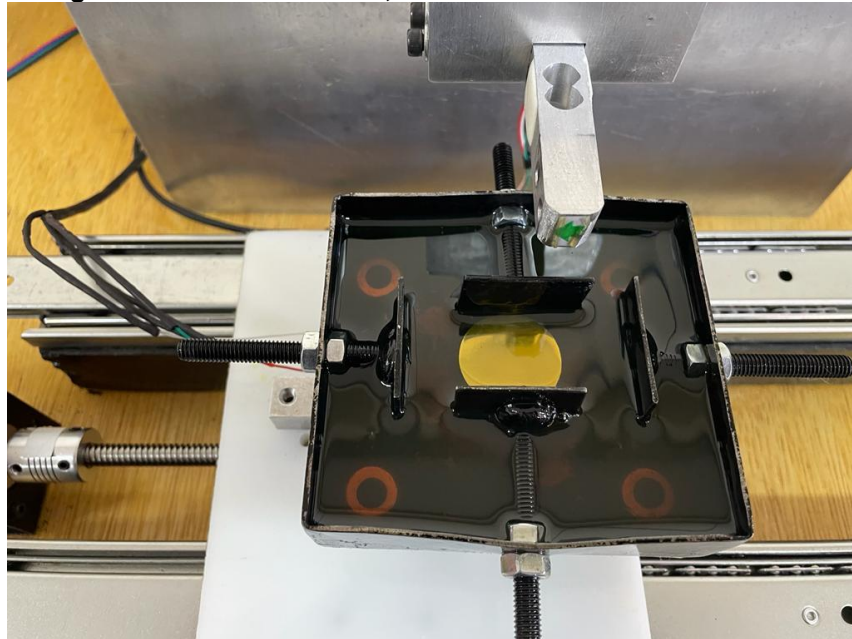
Os materiais utilizados para realizar os testes foram: óleo vegetal de coco babaçu, Figura 9, e óleo sintético SAE 75W90, Figura 10, aproximadamente 100 ml de ambos. Também foram utilizados 6 corpos de provas de aço SAE 4340, polidos, com \varnothing 1" e espessura próxima de 16 mm, Figura 11. As 6 esferas utilizadas foram de aço cromo 52100, com \varnothing 3/8", Figura 12, conforme pede a norma ASTM G133.

Figura 9 – Óleo vegetal de coco babaçu utilizado nos testes



Fonte: Autor, 2022

Figura 10 – Óleo comercial, SAE 75W90 utilizado nos testes



Fonte: Autor, 2022

Figura 11 – Corpo de prova, aço 4340



Fonte: Autor, 2022

Figura 12 – Esferas de aço cromo 52100



Fonte: Autor, 2022

Além dos materiais utilizados, também foram necessários alguns equipamentos para realização dos testes e medição das peças.

O equipamento principal, onde foram realizados os testes, o tribômetro do tipo esfera sobre plano, Figura 8, foi desenvolvido e testado por Valegura, 2022, tendo uma estabilidade em seus testes e com isso uma confiabilidade boa. (VALEGURA, 2022).

Para realizar as medições de rugosidade média (R_a) dos corpos de prova, foi utilizado o rugosímetro portátil SJ-210 MITUTOYO, Figura 13, que tem uma alta precisão. Foi utilizado o laboratório de usinagem para fazer as medições.

Figura 13 – Rugosímetro portátil SJ-210 MITUTOYO



Fonte: Autor, 2022

Por fim, para realizar as medidas de massa das amostras, a balança de precisão ATY 224 SHIMADZU, com uma precisão de 4 casas decimais, Figura 14, foi utilizada no laboratório de química.

Figura 14 – Balança de precisão ATY 224 SHIMADZU



Fonte: Autor, 2022

3.2 Métodos

Foi feito um benchmarking com 17 equipes que participam das competições BAJA SAE, e por meio dele notou-se que a maioria das equipes utilizam o aço SAE 4340 em suas engrenagens e o óleo SAE 75W90 como lubrificante, como pode ser visto no apêndice A. Com isso foram considerados esses fatos para poder avaliar o comportamento do óleo vegetal de coco babaçu.

3.2.1 Preparação das amostras

Segundo a norma ASTM G133, os corpos de provas devem ter uma rugosidade de 0,02 a 0,05 μm . Assim, para ter-se um resultado mais fiel, os corpos de prova foram devidamente polidos.

Antes da realização dos testes as 6 amostras, de aço SAE 4340, foram pesadas na balança de precisão, posteriormente foram medidas as suas respectivas rugosidades.

As Tabelas 4 e 5 trazem as dimensões de cada amostras e suas respectivas massas e rugosidades.

Tabela 4 – Dimensões e propriedades das amostras testadas no óleo comercial

Amostra	Massa (g)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Rugosidade (μm)
1	65,3926	15,92	8432,34	0,057
2	65,8615	15,84	8440,09	0,036
3	65,6389	15,85	8423,35	0,032

Fonte: Autor, 2022

Tabela 5 – Dimensões e propriedades das amostras testadas no óleo vegetal

Amostra	Massa (g)	Espessura (mm)	Volume (mm³)	Rugosidade (μm)
1	66,1939	15,57	8330,27	0,076
2	66,2547	15,80	8390,00	0,049
3	66,1233	15,70	8361,64	0,065

Fonte: Autor, 2022

O óleo lubrificante vegetal foi adquirido junto a equipe do laboratório de microbiologia da Universidade Estadual de Londrina. A formulação do lubrificante foi feita com óleo de base vegetal junto aos aditivos necessários, como aditivos de pressão, anticorrosivo, entre outros. O óleo tem uma viscosidade de 34,84 mm^2/s e

uma densidade de $0,91 \text{ g/cm}^3$. A formulação não será exposta aqui pois, faz parte do desenvolvimento de um outro trabalho em paralelo a esse, que prevê possível possibilidade de patente de produto.

O óleo lubrificante sintético, comercial, foi de fácil acesso, adquirido no varejo, e tem como característica uma viscosidade de $101 \text{ mm}^2/\text{s}$ e uma densidade de $0,883 \text{ g/cm}^3$. (EVORA, 2021).

3.2.2 Ensaio tribológico

De acordo com a norma ASTM G133, para realizar o teste lubrificado, a esfera tem que ter diâmetro de $3/8''$, o comprimento do deslocamento é de 10 mm , a força nominal é de 200 N , ter uma distância total de deslizamento de 400 m , ter uma lubrificação com imersão total, a umidade relativa estar entre 40 e 60% e a duração do teste ser de 33 min e 20 s .

Porém devido a algumas limitações do tribômetro utilizado, como velocidade de deslocamento e carga suportada algumas condições foram alteradas. Assim foi utilizado uma carga de 100 N e foi percorrido uma distância total de 200 m , os demais parâmetros foram mantidos.

Para o teste ter uma variabilidade menor, foram realizadas 3 repetições para cada tipo de óleo. Com isso se tem um controle maior. Durante os testes, os dados foram captados pela célula de carga do tribômetro. Por meio desses dados é avaliado o coeficiente de atrito durante todo o teste.

Ao final do teste as amostras foram devidamente limpas e pesadas novamente para saber o volume de desgaste.

Na Figura 15 é possível ver o teste sendo executado.

Figura 15 – Teste em execução



Fonte: Autor, 2022

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os testes, como o coeficiente de atrito, e a variação de volume dos corpos de prova. Para ter uma boa comparação, esses resultados serão confrontados com as literaturas.

4.1 Coeficiente de atrito

Com base nos parâmetros utilizados e nos dados obtidos se obtém o coeficiente de atrito cinético por meio da Equação 1.

$$\mu_c = \frac{Fat}{W} \quad (1)$$

Onde:

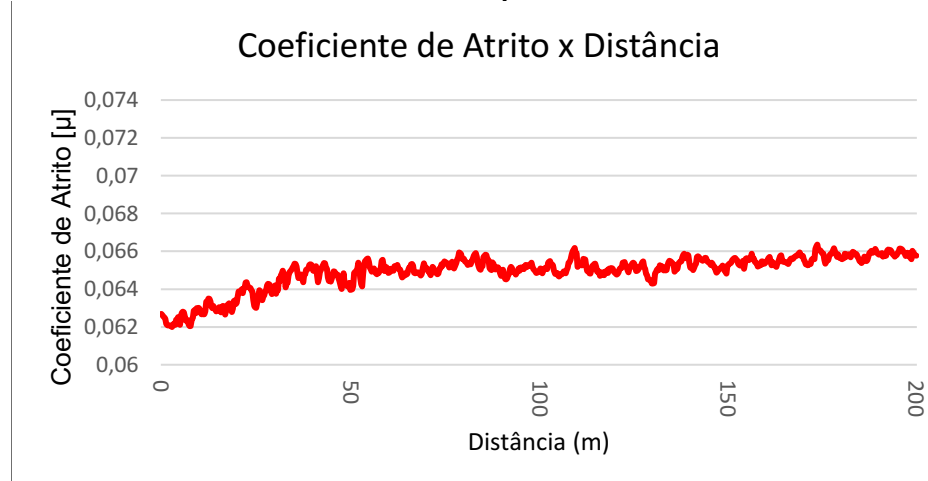
Fat = Força de Atrito [N];

W= Carga Aplicada [N];

μ_c = Coeficiente de atrito.

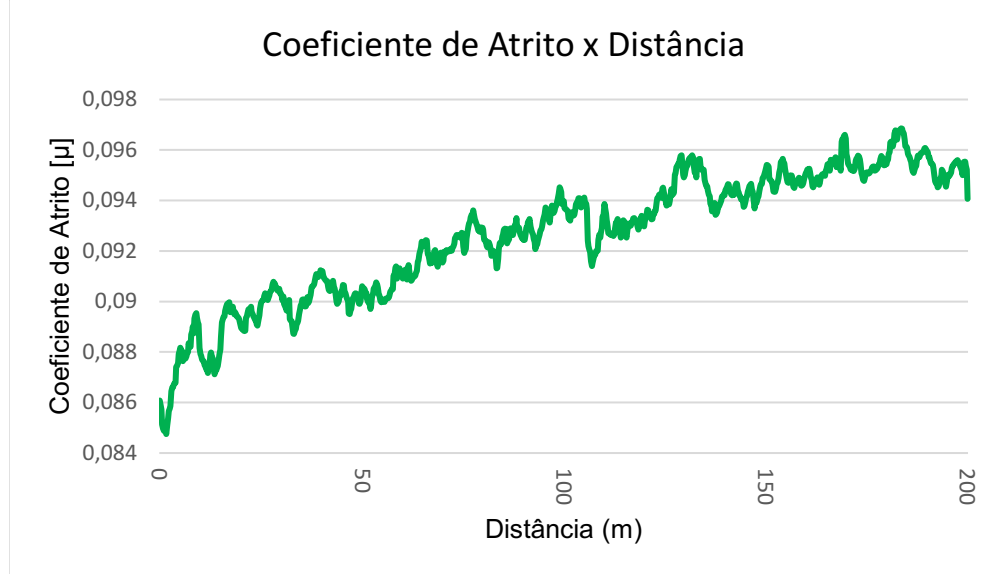
Como dito anteriormente, a carga aplicada nos testes foi de 100 N. Por meio da aceleração do recipiente com o corpo de prova e dos dados de carga obtidos durante os testes foi possível encontrar a força de atrito. Com isso, na Figura 16 é possível analisar o comportamento do coeficiente de atrito no teste feito com óleo comercial e na Figura 17 é possível analisar no teste feito com óleo vegetal de coco babaçu.

Figura 16 – Gráfico do coeficiente de atrito pela distância utilizando óleo comercial



Fonte: Autor, 2022

Figura 17 – Gráfico do coeficiente de atrito pela distância, utilizando óleo vegetal



Fonte: Autor, 2022

Esse comportamento, do coeficiente de atrito subir, conforme vai aumentando a distância, até se manter constante, foi notado em todos os demais testes, tanto com o óleo comercial quanto com o óleo vegetal. Esse aumento se dá devido a área de contato ir aumentando conforme o decorrer do teste.

Nota-se que mesmo o coeficiente de atrito tendo a tendência de subir em ambos os testes, ele aumenta mais rápido e demora a entrar em constância quando está sendo utilizado o óleo vegetal.

Depois de feito os testes, é possível comparar os resultados obtidos a partir da Tabela 6, para os testes realizados com o óleo comercial.

Tabela 6 – Coeficientes de atrito do aço SAE 4340 utilizando óleo comercial

Amostra	Coeficiente de Atrito (μ)	Desvio da Média
1	0,064	0,004
2	0,055	-0,005
3	0,062	0,002
Média	0,060	
Desvio Padrão	0,0047	
Coeficiente de variação	8%	
Limite de confiança superior	0,066	
Limite de confiança inferior	0,055	

Fonte: Autor, 2022

Fazendo uma análise estatística, nota que os resultados têm um coeficiente de variação de 8%, sendo assim, menor que 15%, ou seja, tem baixa dispersão dos dados, tendo seus dados homogêneos. Esse valor é obtido pela relação entre a média e o desvio padrão das amostras.

Para indicar a margem de incerteza dos dados, foi utilizado um limite de confiança de 95% e foi obtido um limite de 0,0053. Somando esse valor a média, tem-se o limite superior, subtraindo a média desse valor, tem-se o limite inferior de confiança. Como pode ser observado os valores do coeficiente de atrito estão nesse intervalo de confiança.

SERWAY & JEWETT, 2018, apresentou em seu livro um coeficiente de atrito cinético de 0,06 para metais com lubrificação. Já KNIGHT, 2009, apresenta o valor para o coeficiente de atrito cinético para metais lubrificados de 0,05. Nota-se que os valores obtidos nos testes ficaram próximos dos da literatura.

Como já visto anteriormente o comportamento tribológico depende de vários fatores externos, como velocidade, carga, ambiente, entre outros. E esses fatores são as principais causas das divergências entre o teste prático e a literatura.

Já na Tabela 7 estão os resultados obtidos a partir dos testes feitos com o óleo de origem vegetal.

Tabela 7 – Coeficientes de atrito do aço SAE 4340 utilizando óleo vegetal

Amostra	Coeficiente de Atrito (μ)	Desvio da Média
1	0,079	-0,006
2	0,085	0,000
3	0,092	0,007
Média	0,085	
Desvio Padrão	0,0065	
Coeficiente de variação	8%	
Limite de confiança superior	0,093	
Limite de confiança inferior	0,078	

Fonte: Autor, 2022

Em relação aos testes com óleo vegetal, é possível observar que têm o mesmo coeficiente de variação, 8%, podendo concluir que os dados são homogêneos.

O limite de confiança utilizado também foi de 95%, obtendo um limite de 0,0074. Fazendo a somatória e subtração desse valor com a média se tem os limites superiores e inferiores, respectivamente. E assim como no teste com óleo comercial, os coeficientes de atrito ficaram dentro do intervalo.

Em relação aos coeficientes de atrito cinético, observa-se que os valores aumentaram, na média, 41% em relação aos testes anteriores, e conseqüentemente estão acima dos valores da literatura. Esse fato se deve principalmente a viscosidade do óleo vegetal, que é bem menor. Porém isso pode ser corrigido com a adição de aditivos.

4.2 Variação de massa e volume

Ao terminar os testes as amostras foram pesadas novamente para que pudesse ser mensurada sua perda de massa e volume.

A Tabela 8 e Tabela 9 mostra as diferenças de massa e volume dos testes feitos com óleo comercial e óleo vegetal, respectivamente.

Tabela 8 – Massa e volume após testes com óleo comercial

Amostra	Massa Pós Teste (g)	Volume Pós Teste (mm³)	Var. Massa (g)	Var. Volume (mm³)
1	65,3846	8329,25	0,0080	1,02
2	65,8538	8389,02	0,0077	0,98
3	65,6299	8360,50	0,0090	1,15

Fonte: Autor, 2022

Tabela 9 – Massa e volume após testes com óleo vegetal

Amostra	Massa Pós Teste (g)	Volume Pós Teste (mm³)	Var. Massa (g)	Var. Volume (mm³)
1	66,1802	8430,60	0,0137	1,75
2	66,2458	8438,96	0,0089	1,13
3	66,1126	8421,99	0,0107	1,36

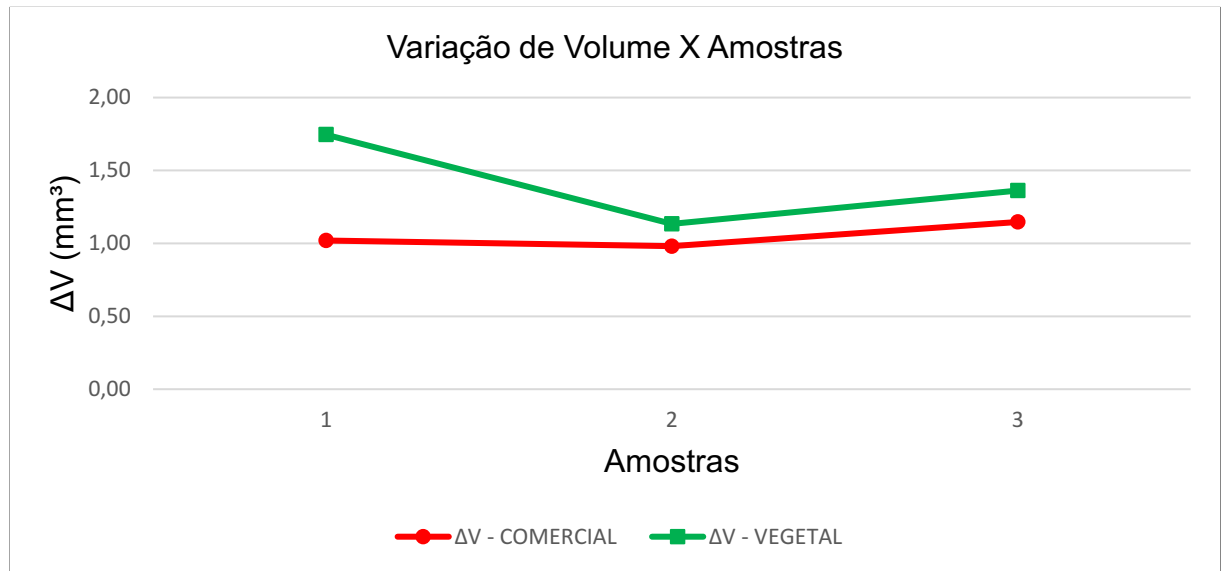
Fonte: Autor, 2022

Tendo a massa dos corpos de prova e sabendo que a densidade do aço 4340 é, aproximadamente, 7,85 g/cm³ pode se calcular o volume inicial e final.

Com base nas Tabelas 8 e 9 notou-se uma maior perda de volume nos corpos de prova testados com óleo vegetal. Uma vez que o coeficiente de atrito foi maior nos

mesmos testes, tendo assim um desgaste maior, devido à falta de lubrificação adequada e conseqüentemente uma perda de volume. Essa diferença pode ser observada na Figura 18, que compara as variações de volume entre as amostras.

Figura 18 – Comparação das variações de volume entre o óleo comercial e o vegetal



Fonte: Autor, 2022

5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foi realizado e atingido seu objetivo principal, que foi analisar o desempenho do óleo de base vegetal do coco babaçu como lubrificante para engrenagens e compará-lo com um óleo comercial. Com isso e tendo os resultados avaliados, é possível concluir que:

- O coeficiente de atrito obtido com o óleo vegetal de coco babaçu foi maior quando comparado ao do óleo comercial;
- O desgaste está diretamente ligado a lubrificação, uma vez que se ela for menor ou carente, a peça sofrerá mais;
- O óleo vegetal se aproximou do coeficiente de atrito literário, podendo concluir que tem potencial para ser utilizado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo seguem listadas algumas sugestões:

- Testar o óleo vegetal com mais alguns aditivos (Melhoramento do Índice de Viscosidade, por exemplo);
- Fazer análise química no óleo lubrificante de base vegetal;
- Fazer análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV) nos corpos de prova;

REFERÊNCIAS

- APROMAC. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados**. 2007. Disponível em: <https://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos_lubrificantes/manuais/gestao_oleos_lubrificantes.pdf>. Acesso em 03 de abr. 2021.
- ASTM G40 - 10b **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**, 2017.
- ASTM G133-05(2016). **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- BARBOSA, Maria do Carmo Lacerda et al. **Efeito do óleo de babaçu (*Orbignya phalerata*) na microcirculação: estudo experimental e avaliação clínica em famílias de quilombolas quebradeiras de coco**. Tese de Doutorado em Biotecnologia] Universidade Federal do Maranhão-UFMA. São Luís, 2012.
- BELMIRO, P. N. A. Brasil no caminho da importação – Cresce demanda por óleos básicos dos grupos II e III. **Lubes em Foco**, n. 66, p. 6-9, 2018. Disponível em: <<http://lubes.com.br/edicoes/edicao66/index.html>>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- BIOLUB. **Óleo para engrenagem: como escolher?**. 2018. Disponível em: <<https://biolub.com.br/blog/oleo-para-engrenagem-como-escolher/>>. Acesso em: 28 de mar. 2021.
- BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. P. 51, CRC press, 2008.
- CARDOSO, Kamila P. **Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificativas**. 2012. 108f. Tese de mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- CARRAZZA, Luis Roberto; SILVA, Mariane Lima da; ÁVILA, João Carlos Cruz. **Manual Tecnológico de Aproveitamento Integral do Fruto do Babaçu**. Brasília – DF. Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN). Brasil, 2012. Disponível em: <<https://ispn.org.br/site/wp-content/uploads/2018/10/ManualTecnologicoBabacu.pdf>> Acesso em: 05 de abr. de 2021.
- CARRERITO, R. P., BELMIRO, P. N. A. **Lubrificantes e lubrificação industrial**. Rio de Janeiro, 2008.
- CERRATINGA. **Babaçu**. 2013. Disponível em: <<http://www.cerratinga.org.br/babacu/>>. Acesso em 30 de mar. 2021.
- CYRINO, Luis. Óleo automotivo e sua classificação. **Manutenção em foco**. 2018. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/oleo-automotivo-e-sua-classificacao/>>. Acesso em 18 de abr. de 2021.

DELGADO, M. A; QUINCHIA, L. A; SPIKES, L. A; GALLEGOS, C. Suitability of ethyl cellulose as multifunctional additive for blends of vegetable oil-based lubricants. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 1-9, 2017.

DESTILARIA BAURU. **Óleo Vegetal Babaçu Refinado**. 2020. Disponível em: <<https://www.destilariabauru.com.br/produto/oleo-vegetal-babacu-refinado/28274>>. Acesso em: 28 de mar. 2021.

ECYLCE. **Óleo de coco babaçu: para que serve**. s.d. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2684-oleo-de-coco-babacu>>. Acesso em: 05 de abr. de 2021.

EMBRAPA. **Ciência desenvolve melhorias na fabricação de produtos de babaçu**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33702498/ciencia-desenvolve-melhorias-na-fabricacao-de-produtos-de-babacu>>. Acesso em 05 de abr. de 2021.

ESSEL. **Lubrificação Industrial I**. Disponível em: <<https://essel.com.br/cursos/material/01/Manutencao/31manu2.pdf>>. Acesso em: 17 de abr. de 2021.

EVORA. **EVORA BLEND GEAR – SAE 75W90**, 2021.

FILHO, P. R. C. F. R; JUNIOR, D. D. M; DE MORAES, M. S; SANTOS, A. R. Propriedades físicas de óleos lubrificantes minerais e vegetais e avaliação de desgastes por four ball. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.5, p.154–163, 2016.

HOLMBERG, Kenneth - COATINGS TRIBOLOGY - **Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering**. 2ª Edição. Elsevier, 2009.

HUTCHINGS, I.M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Arnold, London, cap 6. 133 p. 1992.

INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Qual impacto do óleo básico na composição do lubrificante?**. 2018. Disponível em: <<https://inovacaoindustrial.com.br/oleo-basico/>>. Acesso em: 05 de abr. 2021.

JANSEN, Leonardo Alves. **Lubrificantes & Lubrificação Especial**. 2005.

KNIGHT, R.D. **FÍSICA UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA**. Volume 1. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

MATOS, P. R. R.; POLITI, J. R. S. Óleos vegetais – **Utilização de óleos vegetais como bases lubrificantes**. Lubes em Foco, n. 20, p. 24-26, 2010. Disponível em: <<http://www.lubes.com.br/edicoes/edicao20/index.html>>. Acesso em: 28 mar. 2021.

MATOS, Paulo Roberto Rodrigues. **Utilização de óleos vegetais como bases lubrificantes**. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília 2011.

MOBIL. **Lubrificação Curso Básico**. 8ª Edição. s.d.

PETRONAS. **Princípios Básicos de LUBRIFICANTES E LUBRIFICAÇÃO**, s.d.

PINTO, Arnaldo Manuel Guedes - **INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA MÁQUINA DE ENSAIOS NOS RESULTADOS DE ATRITO E DESGASTE**. 2000. 178f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2000.

RANDALL, N.X. **Tribological Characterization of Biomaterials, Materials for Medical Devices**. ASM Handbook, ASM International, v. 23, p. 147–156, 2012.

SAE BRASIL. **Regulamento Administrativo e Técnico BAJA SAE Brasil – Emenda 3**. 2019.

SANTOS, José Pedro Gonçalves dos – **PROJETO MECANICO DE UM TRIBÓMETRO BLOCO-DISCO**. 2019. 205f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.

SEDUC. **Lubrificação Industrial**. Ceará, 2011. Disponível em: <https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/10/mecanica_lubrificacao_industrial.pdf>. Acesso em 18 de abr. de 2021.

SENAI, CST. **Mecânica – Lubrificação**. 1997. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/docs/apostilas/mecanica-lubrificacao.pdf>>. Acesso em: 07 de abr. de 2021.

SERWAY, R.A; JEWETT, J.W. **Física para cientistas e engenheiros: Volume 1**. 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, c2018.

SILVA, Alberto Eduardo de Oliveira. **Transposição didática: a química dos óleos lubrificantes**. 2011. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Gradação). – Curso de Química, Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SOARES, Rogério Manhães. **Avaliação técnica, mercadológica e de tendências da utilização de óleos lubrificantes de base vegetal**. 2013. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, Gisélia Alves de. **Caracterização Microestrutural de um Aço Médio Carbono e Baixa Liga (Com Estrutura Bainítica/Martensítica) Via Microscopia Óptica**. 2008. 161 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008.

TEXACO BRASIL, Departamento De Tecnologia Da. **Fundamentos de Lubrificação**. 2005.

VALEGURA, Rodolfo Sandoli. **Manufatura e Validação de um Tribômetro Linear Recíproco**. 2022. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.

ZAMBONI, G. E. Óleos Básicos. **Lubes em Foco**, n. 05, p. 12-19, 2008. Disponível em: < <http://www.lubes.com.br/edicoes/edicao05/index.html>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

APÊNDICE A - Benchmarking – Tipos de engrenagens e óleos lubrificantes utilizados pelas equipes BAJA SAE.

Equipe	Material da Engrenagem	Óleo utilizado
Equipe 1	20MnCr5	SAE75W140
Equipe 2	Aço 8620	SAE 80w
Equipe 3	Aço 4340	SAE 80W90
Equipe 4	Aço 8620	SAE 90
Equipe 5	Aço 4340	
Equipe 6	Aço 4340	SAE 75W90
Equipe 7	SAE 4340	SAE 90
Equipe 8	Aço 4340	SAE 75W-90
Equipe 9	Aço 4340	SAE 80W90
Equipe 10	Aço 4340	.
Equipe 11	20MnCr50	SAE 75W-90
Equipe 12	Aço 4140	SAE 75W90
Equipe 13	Aço 8620	GL5 90
Equipe 14	Aço 4340	SAE E75W-90
Equipe 15	Sae 8620	SAE 75W90
Equipe 16	Aço 8620	SAE 75W90
Equipe 17	Aço 8620	SAE 75W-90

Por motivos de confidencialidade, as equipes não foram expostas.