

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Pedro Vedolin Lima



**A AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE ÓLEOS
VEGETAIS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES DE ALTO
DESEMPENHO**

RIO DE JANEIRO

Ficha catalográfica

Pedro Vedolin Lima

A AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE ÓLEOS VEGETAIS EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
Engenheiro Químico.

Aprovado em 15 de Julho de 2025.

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc (DPO/EQ/UFRJ)

Gisel Chenard Diaz, D.Sc (GreenTec/EQ/UFRJ)

Adriana dos Anjos Silva, D.Sc. (DPO/EQ/UFRJ)

Mariana Monteiro Fortes, D.Sc. (PopAlgae)

Rio de Janeiro

2025

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e da minha formação profissional.

Aos meus avós, Dinete e Tamara, por terem mantido vivo em seu neto a paixão pela dúvida e o estudo. Por sempre me acompanharem em meus passos e desafios, meu eterno obrigado.

Aos meus pais, Katia e Jair, pelo apoio, suporte e compreensão incondicional durante a minha trajetória.

À minha companheira, Gabriela, pelo incentivo, carinho e suporte dados nos dias e noites de minha vida e formação. Obrigado por ser meu porto seguro.

Ao time de desenvolvimento de produtos da VIBRA ENERGIA S.A., pela disponibilização de recursos e equipamentos necessários para a realização deste trabalho. Em especial à Rodrigo Pfaffenzeller, Pamela Barreto e Tarcísio Azevedo, pelos ensinamentos, acolhimento e suporte. É uma honra trabalhar ao lado de vocês.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro e à Escola de Química. Dedico especialmente a Professora e Coordenadora do Curso de Engenharia Química Noturno, Raquel Massad, por ter me orientado e me motivado todos esses anos e a professora Yordanka Reyes, pela compreensão e apoio durante esse período.

Agradeço a todos os colegas de curso, em especial ao Edvaldo Neto, Juan Abellás, Felipe Viera, Thiago Pacheco e João Benvindo, que comigo compartilharam essa jornada.

RESUMO

VEDOLIN LIMA, Pedro. A avaliação da viabilidade técnica do uso de óleos vegetais em óleos lubrificantes de alto desempenho. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2025.

Diante do atual cenário global, que demanda a redução de emissões de poluentes e a adoção de práticas sustentáveis, observa-se um aumento significativo na busca por produtos biodegradáveis e de origem renovável em diversos setores industriais. Inseridos nesse contexto, os óleos lubrificantes ganham destaque, considerando seu papel essencial no desempenho e na durabilidade de equipamentos, bem como seu impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. Tradicionalmente, os óleos lubrificantes são compostos majoritariamente por óleos básicos, derivados ou não do refino de petróleo, e aditivos. Atualmente, a maior parte do mercado é suprida por óleos básicos oriundos do refino. No entanto, estima-se que aproximadamente 50% do volume de lubrificantes utilizados no mundo acaba no meio ambiente por evaporação, derramamentos ou acidentes, o que reforça a necessidade de alternativas mais sustentáveis. Os óleos de origem vegetal, por suas características intrínsecas, como biodegradabilidade, origem renovável, isenção de enxofre, elevada lubricidade, baixo índice de volatilização, alto índice de viscosidade e elevado ponto de fulgor, surgem como candidatos promissores para aplicação como óleos básicos. Contudo, suas limitações, especialmente relacionadas à estabilidade oxidativa, hidrolítica e ao desempenho em baixas temperaturas, ainda são desafios técnicos a serem superados. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização de óleos vegetais, especificamente de soja e palma, ambos produzidos no Brasil, na formulação de lubrificantes de última geração para motores a gasolina (API SP/ILSAC GF-6A SAE 5W-30), motores diesel Euro VI (API CK-4 SAE 15W-40). As análises físico-químicas e de desempenho, alinhadas às exigências da API e da ANP, indicam que misturas de óleos vegetais com básicos minerais dos grupos II e III apresentam desempenho satisfatório, configurando uma alternativa viável sob os aspectos técnicos e ambientais.

ABSTRACT

VEDOLIN LIMA, Pedro. *Evaluation of the Technical Feasibility of Using Vegetable Oils in High-Performance Lubricants*. Rio de Janeiro, 2025. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Chemical Engineering) – School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ, 2025.

Given the current global scenario, which demands the reduction of pollutant emissions and the adoption of sustainable practices, there has been a significant increase in the search for biodegradable and renewable-origin products across various industrial sectors. In this context, lubricating oils have gained prominence due to their essential role in the performance and durability of equipment, as well as their environmental impact throughout their life cycle. Traditionally, lubricants are composed mainly of base oils whether derived from petroleum refining or not along with performance additives. Currently, the majority of the market is supplied with base oils from petroleum. However, it is estimated that approximately 50% of all lubricants used globally are eventually released into the environment through evaporation, spills, or accidents, highlighting the urgent need for more sustainable alternatives. Vegetable oils, due to their intrinsic characteristics such as biodegradability, renewable origin, sulfur-free composition, high lubricity, low volatility, high viscosity index, and high flash point, have emerged as promising candidates for use as base fluids. Nevertheless, their limitations, particularly concerning oxidative and hydrolytic stability and low-temperature performance, remain technical challenges to overcome. Therefore, this study aims to evaluate the feasibility of using vegetable oils specifically soybean and palm oils, both produced in Brazil in the formulation of state-of-the-art lubricants for gasoline engines (API SP/ILSAC GF-6A SAE 5W-30) and Euro VI diesel engines (API CK-4 SAE 15W-40). Physicochemical and performance analyses, aligned with the requirements of API and ANP, indicate that blends of vegetable oils with Group II and III mineral base oils demonstrate satisfactory performance, presenting a technically and environmentally viable alternative.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química de hidrocarbonetos presentes nos óleos básicos

Figura 2 - Etileno, a base para diversos óleos básicos sintéticos

Figura 3 – A obtenção de óleos refinados

Figura 4 – Estrutura de óleos vegetais utilizados

Figura 5 – Funcionamento dos dispersantes

Figura 6 – Suspensão, pela ação do detergente, de produtos polares oriundos da oxidação

Figura 7 – Diferentes tipos de polímeros melhoradores de índice de viscosidade.

Figura 8 – Estrutura molecular de dois modificadores de atrito vastamente utilizados

Figura 9 – Formação de fases visíveis na formulação PC SOY 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de óleos básicos.

Tabela 2 – SAE J300 para 5W-30 e 15W-40

Tabela 3 – Formulações Automotivas Avaliadas

Tabela 4 – Relação de ensaios avaliados para óleos de motor.

Tabela 5 – Caracterização dos óleos básicos

Tabela 6 – Resultados físico-químicos obtidos para os óleos de motor *heavy duty*.

Tabela 7 – Resultados físico-químicos obtidos para os óleos de motor para veículos de passeio.

SUMÁRIO

1. Introdução
2. Objetivos Geral e Específicos
3. Fundamentação Teórica
 - 3.1. Propriedades Físico-Químicas De Óleos Lubrificantes.
 - 3.2. Óleos Básicos
 - 3.2.1. Óleos Básicos Minerais
 - 3.2.2. Óleos Básicos Sintéticos
 - 3.2.3. Óleos Básicos Vegetais
 - 3.3. Aditivos para Lubrificantes
 - 3.4. Normas Atuais de Mercado
4. Materiais e Métodos
 - 4.1. Materiais
 - 4.2. Métodos
5. Resultados
6. Conclusões
7. Sugestões
8. Referências Bibliográficas

1. INTRODUÇÃO

O emprego de lubrificantes remonta às civilizações antigas, quando substâncias de origem animal e vegetal eram utilizadas para reduzir o atrito em mecanismos primitivos. Óleos como o de colza e de mamona, bem como gorduras animais, desempenharam papel essencial antes da difusão dos derivados de petróleo. Registros históricos apontam que civilizações do Oriente Médio já produziam graxas há cerca de 4.000 anos, e os egípcios, por volta de 1400 a.C., utilizavam misturas de sebo e azeite para lubrificar eixos de carruagens. Ao longo da Idade Média, o uso desses materiais evoluiu gradualmente, acompanhando o avanço das ferramentas e dos meios de transporte. Contudo, o reconhecimento da importância dos lubrificantes se intensificou com a Revolução Industrial, quando a necessidade de proteger componentes mecânicos se tornou evidente. A partir desse período, os óleos minerais passaram a ser produzidos em escala comercial. Inicialmente obtidos por destilação simples do petróleo, os lubrificantes passaram por aprimoramentos que permitiram a remoção de impurezas, elevando a qualidade e consolidando o petróleo como principal fonte da indústria de lubrificantes. (MORTIER; ORSZULIK, 1999). Atualmente, os lubrificantes são formulações complexas compostas por uma combinação de óleos básicos e pacotes de aditivos químicos que conferem características específicas de desempenho.

De forma geral, podemos dividir os óleos lubrificantes em duas subcategorias: industriais e automotivos. Os óleos industriais englobam: óleo para turbinas, óleo para compressores, óleos isolantes elétricos, óleos para têmpera, óleos hidráulicos, óleo de engrenagem industrial dentre outros. Já os óleos automotivos podem ser descritos em classificações como: óleos para transmissão e eixo, óleos de motores assim como fluido de freio, fluido de arrefecimento e fluido de direção hidráulica. (MANG, 2017). Em equipamentos de alta complexidade, como motores de combustão interna modernos, os lubrificantes precisam atender a requisitos muito mais exigentes. De tal forma, a sua formulação é essencial para conferir propriedades adicionais, como resistência à oxidação, proteção contra corrosão, controle de depósitos, estabilidade da viscosidade em diferentes temperaturas e melhoria das características de fluidez em baixas temperaturas

Dado o crescimento populacional, é natural que a demanda por recursos naturais e o consumo de energia aumentem de forma significativa (Teh et al, 2025). Tal crescimento do consumo energético está diretamente relacionado ao aumento da utilização de máquinas e à intensificação das necessidades de transporte, impulsionados pelo crescimento populacional e pela expansão das atividades humanas. Estima-se que aproximadamente 23% da energia total consumida seja desperdiçada devido ao atrito e ao desgaste em componentes móveis de motores (Malik et al., 2023). No Brasil estima-se que cerca de 30,14% (799,371 mil m³) de todo o volume de lubrificantes comercializados em 2023 foram de óleos de motor para ciclo diesel (13,13%) e ciclo Otto (17,01%) (Painel Dinâmico ANP, 2025).

Somada a constante preocupação em eficiência, observa-se um esforço global direcionado à redução da dependência de produtos derivados do petróleo, motivado tanto pela diminuição das reservas desse recurso quanto pelos impactos ambientais negativos associados ao seu processamento e à utilização de seus derivados. As discussões acerca das questões ambientais, inseridas no amplo conceito de desenvolvimento sustentável, têm se intensificado de maneira significativa na sociedade contemporânea. Assim, o desenvolvimento sustentável busca, de forma simultânea, a eficiência econômica, a justiça social e a harmonia ambiental. Trata-se, portanto, de um processo de mudança que orienta a exploração dos recursos, os investimentos, os rumos do desenvolvimento tecnológico e a transformação institucional, sempre considerando as necessidades das gerações futuras. (MAIMON, 1996)

Neste contexto, o Brasil já tem contribuído para esse movimento global por meio da adoção de biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol. Como por exemplo o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) que tem como objetivo estimular a diversificação das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel, promovendo ao mesmo tempo a inclusão produtiva de pequenos agricultores. (RIBEIRO et al., 2018). Contudo, essa mesma tendência não se verifica no segmento de óleos lubrificantes, que em sua maioria é composto por derivados de petróleo.

Como mencionado, o consumo de óleos lubrificantes vem crescendo continuamente. No entanto, a limitação dos recursos derivados do petróleo e a

crescente preocupação ambiental têm incentivado a busca por alternativas mais sustentáveis, como os óleos de origem vegetal e animal. (CHOWDARY, 2021). Estudos estimam-se que aproximadamente 50% de todo óleo lubrificante fabricado e vendido mundialmente termine no meio ambiente de alguma forma (MANG, 2007). Sendo assim, a indústria encontra-se sob crescente pressão para mitigar seu impacto ambiental, sobretudo no que tange às emissões de gases de efeito estufa e ao consumo de recursos não renováveis. Esse movimento está em consonância com iniciativas globais e com políticas regionais, como o Programa MOVER, lançado no Brasil em dezembro de 2023, que incentiva a neutralidade de carbono e a adoção de matérias-primas renováveis em aplicações industriais (Programa MOVER, 2025).

Contudo, apesar da expansão do mercado de lubrificantes no Brasil, especialmente a partir da década de 2010, não houve investimentos proporcionais na infraestrutura necessária para a produção de óleos básicos de alta qualidade no território nacional. A grande movimentação no mercado de óleos básicos e soluções sustentáveis, até o momento, é capitaneada pela LWART, empresa especializada em rerefino de óleos lubrificantes. Em 2023, foi anunciado um investimento de 1 bilhão de reais na ampliação de sua operação (LWART, 2023). Em 2024, o consumo de óleos básicos no mercado nacional de lubrificantes atingiu um de 1.531.745 metros cúbicos de óleos acabados comercializado, o maior já observado até então. Esse desempenho representou um crescimento de 2,3% em relação ao ano anterior, refletindo o aquecimento do setor automotivo e energético no país. (EM, 2025). Tomando como hipótese, dado que formulações de lubrificantes levam em torno deste percentual, que 95% deste volume é representado por óleos básicos (Mang et al., 2017), o volume de óleos básicos consumido no Brasil, em 2024, foi 1.455.158 m³. No que se refere às importações de óleos básicos, o Brasil trouxe do exterior cerca de 802 mil metros cúbicos. Este volume representou o segundo maior da história, ficando atrás apenas do registrado em 2021, quando o total importado ultrapassou os 868 mil m³. (EM, 2025). Sendo assim, aproximadamente 55% dos óleos básicos consumidos no Brasil, são estrangeiros.

Desta forma, observamos um ponto de atenção na balança comercial, impulsionada cada vez mais pela necessidade de cortes de óleos básicos e melhor qualidade. Contudo, com os esforços frente ao uso de óleos oriundos do terrefino, com base nos dados de 2023, aproximadamente 13% da demanda por óleos básicos nacional foram supridas por esse segmento. (ANP, 2023)

Nesse contexto, os óleos vegetais têm sido estudados como uma alternativa promissora para a produção de lubrificantes com menor impacto ambiental, principalmente por serem biodegradáveis, renováveis e apresentarem bom desempenho em termos de lubricidade. No entanto, seu uso em aplicações industriais ainda encontra limitações importantes, como a baixa estabilidade térmica e oxidativa, desempenho insatisfatório em temperaturas reduzidas e uma faixa restrita de viscosidades disponíveis. (FOX 2007)

Segundo o levantamento da Associação Brasileira de Indústria de Óleos Vegetais (ABIOVE), o Brasil atingiu uma capacidade total de processamento de oleaginosas de 72,3 milhões de toneladas no fechamento da safra de 2024, um crescimento de 4,5% em comparação ao ano anterior, que registrou 69,2 milhões de toneladas (ABIOVE, 2024). Segundo o IBGE, a produção de soja, nossa principal *commodity*, terá estimativa de recorde em 2025 com 164,2 milhões de toneladas, 13,3% de aumento frente à 2024 (AGÊNCIA GOV, 2025)

Embora os lubrificantes representem uma fração relativamente pequena da pegada de carbono automotiva, sua descarbonização contribui para estratégias mais amplas de sustentabilidade. Mais importante ainda, o uso de matérias-primas renováveis produzidas no Brasil abre oportunidades para reduzir a dependência nacional de óleos básicos importados, além de promover inovação e geração de valor nos setores agroindustrial e químico do país. A crescente preocupação com os impactos ambientais associados ao uso de produtos não biodegradáveis tem sido progressivamente incorporada à legislação. Alinhado a essa tendência, prevê-se que o descarte de óleos lubrificantes não biodegradáveis se torne economicamente mais oneroso, o que reduzirá a atratividade desses produtos em função do aumento dos custos associados ao seu ciclo de vida.

Neste contexto o presente trabalho busca, por meio do desenvolvimento de formulações alternativas, avaliar, de forma técnica, a capacidade de suprimento da cadeia automotiva na substituição de óleos minerais por óleos vegetais refinados brasileiros.

2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é a realização de uma avaliação da viabilidade técnica do uso de formulações a base de óleo vegetal (soja e palma refinados) em óleos de motor dedicado a carros de passeio e de serviços pesados (caminhões e ônibus).

Com o intuito de atingir o objetivo geral apresentado, propõem-se dois objetivos específicos: a partir da avaliação de formulações lubrificantes baseados na mistura de óleos básicos derivados de petróleo com adição de óleos vegetais e aditivos, avaliar quanto a performance físico-química e a viabilidade técnica quando comparadas com as normas mais atuais do mercado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico tem como objetivo promover um aprofundamento teórico nas definições utilizadas durante o trabalho assim como estressar as diferenças entre as diferentes aplicações possíveis dos lubrificantes automotivos e industriais. Para tal faz-se necessário primeiramente definir o óleo lubrificante como um todo.

3.1. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE ÓLEOS LUBRIFICANTES.

A viscosidade é uma propriedade fundamental de diversos produtos derivados de petróleo, bem como de alguns materiais não petrolíferos utilizados como lubrificantes. O desempenho adequado de equipamentos depende diretamente da viscosidade apropriada do fluido em uso. Além disso, no caso de muitos combustíveis derivados de petróleo, conhecer a viscosidade é essencial para definir as melhores condições de armazenamento, manuseio e operação. Por isso, a medição precisa dessa propriedade é indispensável em diversas especificações de produto.

O método ASTM 445, estabelece um procedimento para determinar a viscosidade cinemática (v) de produtos líquidos derivados de petróleo, sejam transparentes ou opacos. A medição é feita com base no tempo necessário para um volume de líquido escoar, por gravidade, através de um viscosímetro capilar de vidro devidamente calibrado. A viscosidade dinâmica (η) pode ser obtida multiplicando-se a viscosidade cinemática (v) pela densidade (ρ) do líquido. A faixa de viscosidade cinemática coberta por este método varia entre 0,2 mm²/s e 300.000 mm²/s, em qualquer temperatura. No entanto, a precisão foi determinada apenas para os materiais, faixas de viscosidade e temperaturas especificadas nas notas de rodapé da seção de precisão. (ASTM 445)

Com as medidas obtidas de viscosidade cinemática a 40°C e a 100°C calcula-se o índice de viscosidade (ASTM D2270). O Índice de Viscosidade (VI) é uma medida amplamente adotada para expressar a variação da viscosidade cinemática de um produto petrolífero em função da temperatura, especificamente entre 40 °C e 100 °C. Quanto maior o valor do índice de viscosidade, menor é a redução da viscosidade cinemática com o aumento da temperatura, o que indica maior estabilidade térmica do lubrificante.

O método ASTM 5293, estabelece um procedimento laboratorial para determinar a viscosidade aparente de óleos de motor e óleos básicos utilizando o Simulador de Partida a Frio (CCS), em temperaturas entre –10 °C e –35 °C. A viscosidade aparente medida pelo CCS (Simulador de Partida a Frio) tem boa correlação com o desempenho do motor durante a partida em baixas temperaturas. No entanto, essa medida não deve ser usada para prever o comportamento de fluxo do óleo até a bomba ou seu sistema de distribuição em baixas temperaturas. (ASTM D5293)

Quando um óleo de motor é submetido ao resfriamento, tanto a taxa quanto a duração desse processo podem influenciar significativamente o seu esforço de escoamento (*yield stress*) e sua viscosidade. Sendo assim faz-se também necessário avaliar e determinar o esforço de escoamento juntamente a viscosidade aparente à baixa temperatura. Para isso foi proposto o método ASTM D4684. Nesse ensaio o óleo novo é inicialmente resfriado de forma lenta por uma faixa de temperatura na qual ocorre a cristalização de parafinas. Em seguida, aplica-se um resfriamento mais rápido até a temperatura final do teste.

De forma geral o método descreve o esforço de escoamento e a viscosidade de óleos de motor após serem resfriados sob condições controladas durante um período superior a 45 horas, até uma temperatura final entre -10°C e -40°C .

Esse procedimento tem demonstrado eficácia na identificação de óleos que apresentam falhas de bombeabilidade em campo, especialmente aqueles testados a -25°C . Essas falhas são atribuídas à formação de uma estrutura semelhante a um gel, que eleva de forma excessiva o esforço de escoamento, a viscosidade, ou ambos, impedindo o fluxo adequado do óleo em baixas temperaturas.

Ainda acerca da viscosidade aparente, outro método padrão utilizado é a ASTM D5481. Este método é garante a medição da viscosidade aparente em altas temperaturas e altas taxas de cisalhamento por meio de viscosímetro capilar multicelular tem como objetivo determinar a viscosidade de óleos lubrificantes em condições severas. Este método simula as condições encontradas nos mancais de motores automotivos em uso severo, estabelecendo medições a 150°C com uma taxa aparente de cisalhamento na parede de $1,4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Esse ajuste compensa a variação natural da taxa de cisalhamento no interior do tubo capilar. Muitos fabricantes de equipamentos e normas de desempenho de lubrificantes exigem valores mínimos de viscosidade sob essas condições de alta temperatura e alto cisalhamento (HTHS – High Temperature High Shear). (ASTM D5481)

Dentre outras propriedades clássicas, é prática comum a avaliação do ponto de fluidez (ASTM D97). O ponto de fluidez de um derivado de petróleo serve como indicador da menor temperatura em que o produto pode ser utilizado com eficácia em determinadas aplicações. Esse método avalia a partir de um resfriamento lento a temperatura na qual o óleo para de fluir e ou congela. Essa propriedade é fundamental para avaliar o comportamento de lubrificantes e combustíveis em ambientes frios.

A perda por evaporação (ASTM D5800) é uma característica especialmente relevante em aplicações de lubrificação de motores, onde ocorrem altas temperaturas que podem provocar a evaporação de frações do óleo. A evaporação pode contribuir para o aumento do consumo de óleo no

motor, além de alterar suas propriedades físico-químicas, afetando o desempenho e a durabilidade. Muitos fabricantes de motores especificam um limite máximo admissível de perda por evaporação, visando assegurar desempenho e proteção adequados.

3.2. ÓLEOS BÁSICOS

Os óleos básicos representam a fração majoritária na formulação de lubrificantes, correspondendo a aproximadamente de 80 a 95% do volume total, enquanto os aditivos químicos e outros componentes perfazem os 10 a 20% restantes. A principal função dos óleos básicos consiste em fornecer a camada fluida essencial para a lubrificação, cuja atuação se dá na separação de superfícies em movimento, reduzindo o atrito e o desgaste. (MANG, 2007)

Historicamente, os requisitos fundamentais desses materiais restringiam-se à obtenção de uma viscosidade adequada e à ausência de componentes ácidos. Contudo, a partir da década de 1970, a crescente demanda por níveis superiores de desempenho impulsionou o desenvolvimento de fluidos sintéticos, caracterizados por estruturas químicas mais uniformes e propriedades aprimoradas. Esse avanço decorreu não apenas das exigências técnicas, mas também de requisitos ambientais e de saúde ocupacional, que passaram a orientar o desenvolvimento dos óleos básicos nas décadas subsequentes.

O óleo básico tem a função primária de promover a lubrificação, atuando diretamente na formação de uma película entre as superfícies em movimento.

Entre as principais funções dos lubrificantes, destacam-se:

- Reduzir atrito e desgaste, formando uma película fluida entre as partes móveis;
- Atuar como agente de refrigeração, dissipando o calor gerado no atrito;
- Remover contaminantes e partículas resultantes do desgaste;
- Controlar e minimizar o atrito, assegurando eficiência operacional;

- Facilitar o movimento relativo entre superfícies em contato.

Os óleos básicos lubrificantes são divididos em duas categorias principais: minerais e sintéticos. Os minerais derivam do fracionamento de petróleos parafínicos, sendo as frações obtidas por destilação a vácuo posteriormente refinadas para atender às exigências técnicas de desempenho, como viscosidade, ponto de fluidez, índice de viscosidade, cor e teor de enxofre. Em uma refinaria, cerca de 12% do volume de petróleo processado é destinado à produção desses óleos (MATOS, 2004).

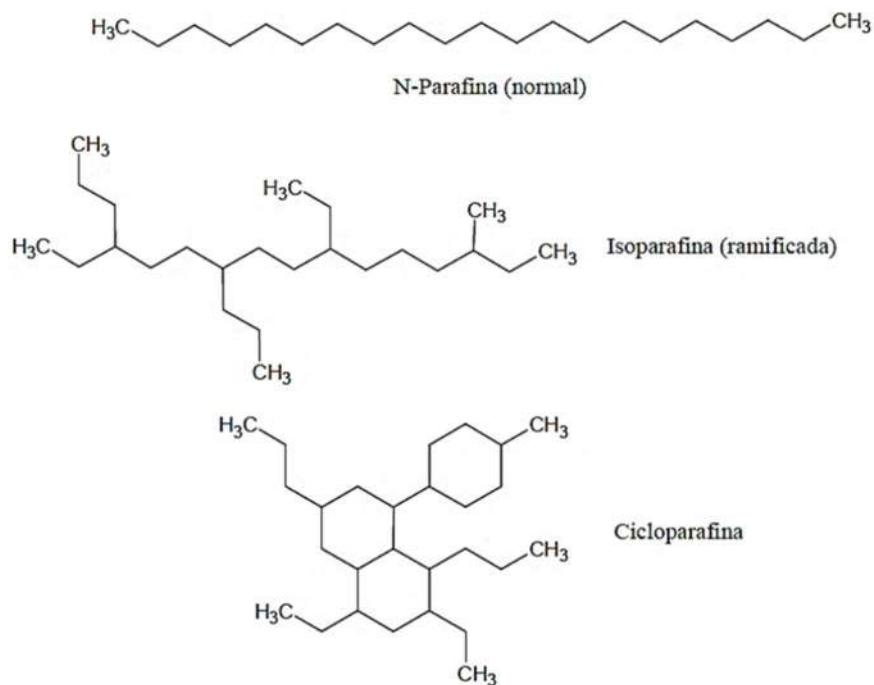
3.2.1. ÓLEOS BÁSICOS MINERAIS

Os óleos básicos de origem mineral são obtidos a partir do refino do petróleo bruto. Sua composição química é extremamente complexa, envolvendo milhares de compostos, principalmente hidrocarbonetos do tipo parafínico, naftênico e aromático. Dada essa complexidade, sua caracterização não é feita de forma molecular precisa, mas sim pela definição de propriedades físico-químicas e pela identificação e quantificação de classes de compostos com características estruturais semelhantes.

O processo de obtenção desses óleos envolve várias etapas. Inicialmente, realiza-se a destilação fracionada, seguida da destilação a vácuo, que permite a separação de cortes de diferentes faixas de viscosidade. Na sequência, emprega-se a desasfaltação, que consiste na extração de frações altamente viscosas presentes no resíduo da destilação, utilizando-se, geralmente, propano como solvente. Este processo é responsável pela separação de materiais como *brightstocks* do asfalto residual. (MANG, 2007).

A depender da estrutura química dominante, os óleos básicos minerais se classificam como: parafínicos, naftênicos ou aromáticos. Abaixo, na Figura 1, estão ilustrados os tipos de estruturas químicas predominantes no óleo básico:

Figura 1 – Estrutura química de hidrocarbonetos presentes nos óleos básicos



Fonte: Adaptado de Pimentel 2012

Historicamente, os processos tradicionais de refino incluíam técnicas como o refino ácido e a extração por solventes, ambos empregados na remoção de compostos que impactam negativamente o desempenho do lubrificante, particularmente no que tange à estabilidade térmica, ao comportamento viscosidade-temperatura e às propriedades de fluidez em baixas temperaturas. Embora a extração por solventes tenha sido amplamente utilizada, os processos de hidrogenação e, sobretudo, de hidrocraqueamento passaram a dominar nas plantas modernas de refino, em razão da sua maior eficiência na remoção de compostos indesejáveis e na produção de óleos de maior pureza. O hidrocraqueamento, em particular, destaca-se por promover a quebra de componentes de baixo índice de viscosidade (IV) e pela saturação de compostos aromáticos, resultando em óleos básicos de qualidade superior. A severidade aplicada no processo exerce influência direta sobre as propriedades finais do óleo, sendo que operações de alta severidade conduzem à obtenção de produtos com elevado índice de viscosidade e reduzida volatilidade. (MANG, 2007)

A classificação dos óleos básicos, estabelecida pelo *American Petroleum Institute* (API) em conjunto com a *Association Technique de l'Industrie*

Européenne des Lubrifiants (ATIEL), organiza estes materiais com base em parâmetros químicos e físico-químicos, de modo a garantir a intercambialidade e a padronização dos produtos, especialmente no que se refere às formulações de óleos para motores. Inicialmente composta por quatro grupos, essa classificação foi expandida para cinco, em virtude da introdução dos óleos de muito alto índice de viscosidade (VHVI) no mercado europeu.

De tal forma, a Tabela 1, ilustra quanto à classificação dos óleos básicos de acordo com a API e ATIEL.

Os óleos pertencentes ao Grupo I são óleos parafínicos tipicamente obtidos por extração com solventes, conhecidos como óleos SN. Apresentam teores de saturados inferiores a 90 % e/ou concentrações de enxofre superiores a 0,03 %, além de um índice de viscosidade situado entre 80 e 120.

Tabela 1 – Classificação de óleos básicos.

Grupo	Teor de Saturados	Teor de Enxofre	Índice de Viscosidade
Grupo I	80 a 119	$\geq 0,03$	≤ 90
Grupo II	80 a 119	$< 0,03$	> 90
Grupo III	≥ 120	$< 0,03$	> 90

Fonte: Adaptado de NGLI (API GROUP I-IV)

Já os óleos do Grupo II, são óleos parafínicos produzidos por processos de hidrogenação ou hidrocraqueamento, possuem teores de saturados superiores a 90 % e teores de enxofre inferiores a 0,03 %, mantendo, contudo, o índice de viscosidade na faixa de 80 a 120. Os óleos classificados no Grupo III

são aqueles obtidos mediante hidrocraqueamento severo e, em alguns casos, processos adicionais de isomerização de ceras. Tais produtos apresentam teores de saturados superiores a 90 %, enxofre inferior a 0,03 % e índice de viscosidade superior a 120 (API Groups I-V | NLGI", 2024). Esses óleos caracterizam-se por seu baixo teor de enxofre, elevado índice de viscosidade e reduzida volatilidade, além de exibirem estabilidade oxidativa significativamente superior quando comparados aos óleos refinados por solvente, principalmente em virtude da sua alta pureza química (MANG, 2007).

3.2.2. ÓLEOS BÁSICOS SINTÉTICOS

No que se refere aos óleos básicos sintéticos, estes são obtidos por meio de reações químicas específicas, partindo de moléculas definidas, o que permite adaptar suas propriedades conforme as exigências de cada aplicação. Uma característica fundamental desses óleos é a elevada uniformidade de suas estruturas químicas, em contraste com os óleos minerais.

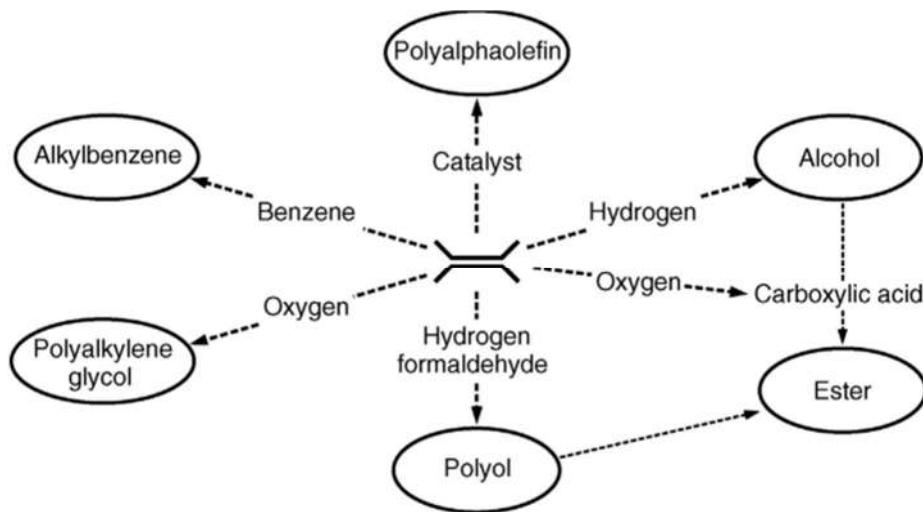
Assim, ainda dentro da classificação API-ATIEL para óleos básicos temos os Grupo IV e V. O Grupo IV compreende os óleos sintéticos do tipo poli-alfa-olefina (PAO), que são hidrocarbonetos obtidos pela polimerização de olefinas. Este processo permite a produção de óleos com diferentes faixas de viscosidade, combinando alto índice de viscosidade natural e baixos pontos de fluidez. Por fim, o Grupo V inclui todos os demais óleos básicos que não se enquadram nos grupos anteriores, englobando uma ampla gama de compostos de origem sintética ou natural (API Groups I-V | NLGI", 2024).

Dentre os principais exemplos de óleos sintéticos destacam-se os próprios poli-alfa-olefinas (PAOs), os ésteres sintéticos tanto os derivados de ácidos dicarboxílicos quanto os ésteres de polióis, além de compostos como polibutenos, aromáticos alquilados, poliglicóis de alquíleno, polifenil éteres, polissiloxanos (óleos de silicone) e ésteres de fosfato. O termo *poli-alfa-olefina* (PAO), quando empregado para designar óleos básicos lubrificantes, refere-se a oligômeros hidrogenados de uma alfa-olefina, geralmente a 1-decenol.

Diversas metodologias têm sido investigadas para a oligomerização de alfa-olefinas com a finalidade de produzir óleos básicos lubrificantes, destacando-se entre as mais relevantes os processos via radicais livres, catálise

de Ziegler e catálise catiônica do tipo Friedel-Crafts. A Figura 2 abaixo ilustra de maneira genérica formas de obtenção de básicos sintéticos a partir do etileno.

Figura 2 - Etileno, a base para diversos óleos básicos sintéticos



Fonte: Adaptado de MANG, 2007

Após a oligomerização, os produtos insaturados são separados da mistura reacional e, posteriormente, hidrogenados com o uso de catalisadores à base de níquel ou paládio suportados, precedida da remoção do monômero residual indesejado. A fração resultante pode então ser submetida à fracionamento com o objetivo de obtenção dos graus de viscosidade desejados, sendo os mais comuns aqueles com viscosidades cinemáticas de 2, 4, 6 ou 8 cSt a 100 °C. (MORTIER; ORSZULIK, 1999)

De maneira geral, os fluidos sintéticos, especialmente PAOs e ésteres, oferecem desempenho significativamente superior quando comparados aos óleos minerais, sobretudo no que diz respeito à estabilidade térmica, resistência à oxidação, compatibilidade com materiais e desempenho tribológico. Os ésteres sintéticos, notadamente os saturados de alta pureza, destacam-se por sua excelente estabilidade à oxidação, elevada compatibilidade com elastômeros e excelente comportamento em sistemas operando sob altas pressões e temperaturas. Entretanto, é importante salientar que os óleos básicos sintéticos podem apresentar limitações quanto à compatibilidade com determinados

aditivos, bem como com alguns elastômeros, quando comparados aos óleos minerais.

3.2.3. ÓLEOS BÁSICOS VEGETAIS

Agrupados como Grupo V, segundo a classificação API (API Groups I-V | NLGI", 2024), as gorduras e os óleos derivados de fontes animais e vegetais possuem uma longa história de aplicação em lubrificação (MORTIER, 1999). Esses foram a principal fonte de lubrificantes antes da ampla expansão dos produtos à base de óleo mineral, ocorrida na primeira metade do século XX. Atualmente, os lubrificantes modernos são predominantemente formulados a partir de óleo mineral, principalmente devido ao seu menor custo e desempenho geral superior.

O aumento contínuo dos preços do petróleo, o esgotamento das reservas globais de petróleo bruto e a crescente preocupação ambiental relacionada à poluição provocada por óleos lubrificantes e seus vazamentos não controlados têm impulsionado o interesse no desenvolvimento e na adoção de alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, os biolubrificantes surgem como substitutos promissores aos óleos minerais, destacando-se por suas propriedades técnicas naturais e por serem biodegradáveis. Diversos pesquisadores já relataram o uso de óleos vegetais como combustível em motores; no entanto, há poucos registros sobre sua aplicação como base para lubrificantes automotivos. (MOBARAK, 2014)

Os óleos vegetais são majoritariamente constituídos por triacilglicerídeos e têm despertado interesse crescente como base para lubrificantes, devido às suas propriedades intrinsecamente favoráveis. Diversos estudos apontam que esses óleos apresentam elevado índice de viscosidade, excelente lubricidade, alto ponto de fulgor, baixa volatilidade, boa biodegradabilidade e reduzida toxicidade, além de atuarem como solventes eficazes para aditivos. Sua estrutura química, caracterizada por ligações ésteres e natureza polar, favorece a adsorção sobre superfícies metálicas, o que contribui para uma lubrificação mais eficiente (CHOWDARY, 2025). Apesar dessas vantagens, os óleos vegetais ainda enfrentam desafios técnicos, especialmente relacionados à baixa estabilidade térmica e oxidativa, bem como ao desempenho insatisfatório em

temperaturas reduzidas, limitações essas atribuídas à presença de ligações insaturadas em sua composição molecular. Para aprimorar a estabilidade oxidativa e térmica, grande parte dos estudos tem adotado modificações químicas nos óleos vegetais, cujos resultados demonstraram efeitos positivos (CHOWDARY, 2025).

Contudo, grande concentração dos esforços em formulações utilizando como base óleos vegetais, utilizam aditivos desenhados para as necessidades de um óleo básico oriundo do petróleo (RUDNICK, 2009). Nesse contexto, é esperado que, devido a diferença de polaridade entre as bases minerais e vegetais, haja diferença na compatibilidade e performance dos aditivos lubrificantes atuais com os óleos vegetais.

A obtenção dos óleos vegetais refinados pode ser dada por diferentes rotas e diferentes matérias primas de forma que produção de óleos vegetais está diretamente associada ao teor de lipídios presente nas sementes, o qual varia conforme a espécie utilizada. Por exemplo, a colza contém aproximadamente 45% de óleo em sua estrutura, ao passo que a soja apresenta cerca de 20% (TORBACKE, 2014), o que gera variações significativas no rendimento conforme a matéria-prima utilizada.

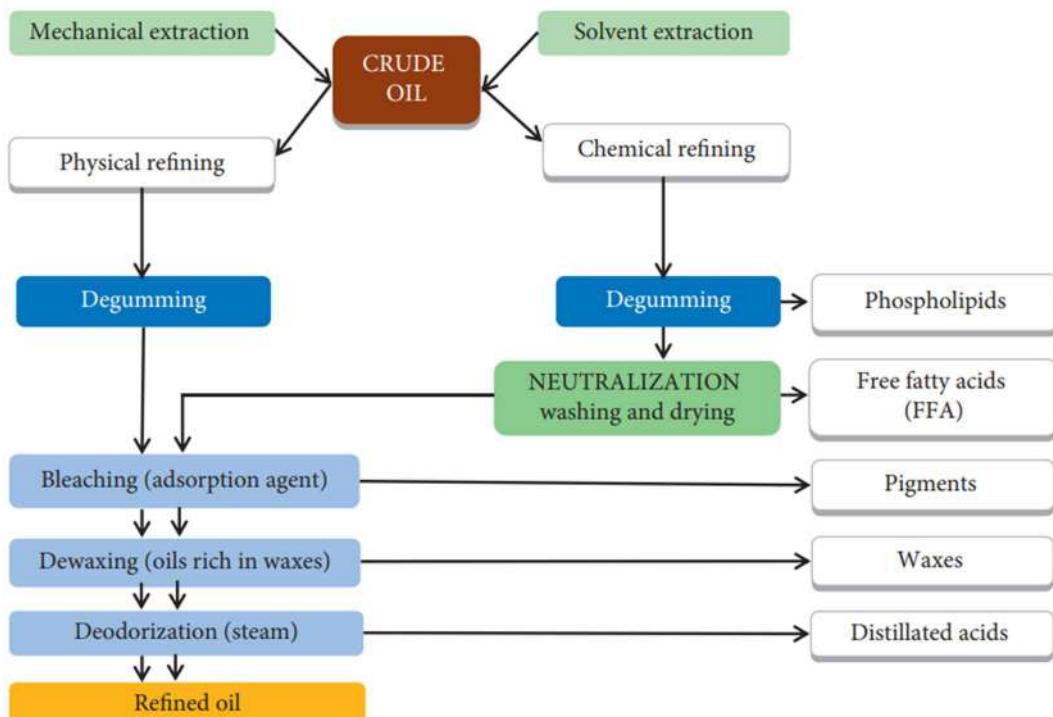
O processo de obtenção desses óleos é conduzido, inicialmente, por meio de extração mecânica, na qual a aplicação de pressão sobre as sementes promove a liberação do óleo contido em suas estruturas celulares. Esta etapa, embora eficiente, não é capaz de recuperar integralmente o óleo, sendo, portanto, complementada por uma extração química. Nessa fase, emprega-se um solvente seletivo que percola o resíduo sólido remanescente da prensagem, permitindo a solubilização do óleo residual. Como resultado, obtêm-se rendimentos altamente satisfatórios, reduzindo-se o conteúdo residual de óleo nas sementes a valores inferiores a 1% (MORETTO, 1986).

Concluída a extração, torna-se necessário submeter o óleo bruto a um processo de refino, cujo objetivo central é assegurar sua qualidade, estabilidade e adequação às aplicações industriais. Este procedimento visa a remoção de impurezas, que incluem, entre outros, materiais inorgânicos, ácidos graxos livres, compostos poliméricos, pigmentos, proteínas e fosfatídeos.

O refino é, tipicamente, estruturado em etapas sequenciais, destacando-se a degomagem e a neutralização. A degomagem consiste na adição de água sob condições controladas de aquecimento e agitação, promovendo a hidratação de compostos fosfatídicos, proteínas e materiais coloidais. Esses componentes, ao reagirem com a água, formam uma fase gomosa que é separada por centrifugação. Como subproduto desse processo, obtém-se a lecitina, material de elevado valor comercial amplamente empregado nas indústrias alimentícia e farmacêutica (RITTNER, 2002). Na sequência, realiza-se a neutralização, etapa destinada à remoção dos ácidos graxos livres presentes no óleo, além de compostos de degradação e eventuais proteínas residuais. Este processo envolve a adição de uma solução alcalina, geralmente hidróxido de sódio, em proporções calculadas com base na acidez do óleo. A operação ocorre sob temperaturas controladas, entre 60 e 90 °C, garantindo a formação de sabões insolúveis, que são posteriormente removidos, resultando em um óleo com características aprimoradas

A Figura 3 ilustra as diferentes rotas possíveis de obtenção de um óleo vegetal refinado.

Figura 3 – A obtenção de óleos refinados

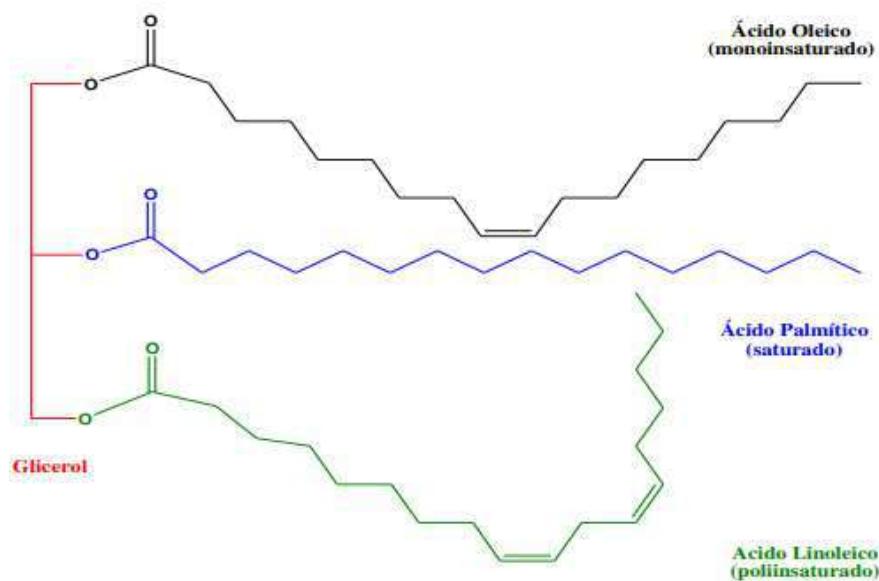


Fonte: Adaptado de GHARBY, 2022 .Refining Vegetable Oils: Chemical and Physical Refining, 2022

Embora geralmente eficientes, dependendo da especificidade da aplicação, possam ser incorporadas fases adicionais, como o branqueamento e a desodorização.

A maioria dos óleos vegetais (assim como as gorduras e óleos de origem animal) apresenta estrutura do tipo triglicerídeo. Esses tri-ésteres derivam da reação entre o glicerol e ácidos carboxílicos conhecidos como ácidos graxos. A Figura 4 ilustra de forma genérica o perfil de estrutura de um óleo vegetal.

Figura 4 – Estrutura de óleos vegetais



Fonte: Adaptado de (SANCHES, 2024)

Os ácidos graxos presentes nesses óleos quase sempre são de cadeia linear, contendo entre 8 e 22 átomos de carbono, podendo ser saturados, monoinsaturados ou poli-insaturados. A composição dos óleos vegetais é normalmente descrita com base no conteúdo de ácidos graxos, referindo-se às

frações ésteres; já os ácidos graxos presentes em sua forma livre no óleo são denominados ácidos graxos livres. (MORTIER; ORSZULIK, 1999).

Dentre os óleos vegetais, os óleos de soja e palma ganham destaque no cenário brasileiro.

O óleo de palma obtido no Brasil, pode ser produzida através de uma hibridização de sementes favorecendo a formação de um óleo de palma com alto teor de ácido oleico. Segundo a Embrapa (2023), no Brasil, o estado do Pará destaca-se na produção desse óleo híbrido, com cerca de 7.000 toneladas anuais e expansão da área plantada. Há uma iniciativa no Codex Alimentarius para estabelecer um padrão de qualidade para esse óleo, tornando a análise da sua composição fundamental. Neste estudo, 80 amostras coletadas entre 2016 e 2017 foram analisadas por cromatografia gasosa, revelando que os principais ácidos graxos são oleicos (52-57%), palmítico (25-30%), linoleico (10-13%) e esteárico (3-4,5%), além de pequenas quantidades de outros ácidos (MACHADO, 2013).

Na soja, os ácidos graxos insaturados representam cerca de 86% do total, sendo o ácido linoleico o mais abundante, com aproximadamente 54%. Pesquisas indicam que, entre os genótipos de soja, o teor médio do ácido palmítico (C16:0) varia entre 8% e 17%; o esteárico (C18:0), entre 3% e 30%; o oleico (C18:1), entre 25% e 60%; o linoleico (C18:2), entre 25% e 60%; e o linolênico (C18:3), entre 2% e 15% (HAMMOND; GLAZ, 1989). Estudos com sementes de soja em território brasileiro demonstram que por mais que existam variações de teores em partes distintas da semente, o ácido linoleico é o mais abundante em todas as partes dos grãos analisados e não foi encontrado distinção entre as partes da soja para este ácido (SILVA, 2010).

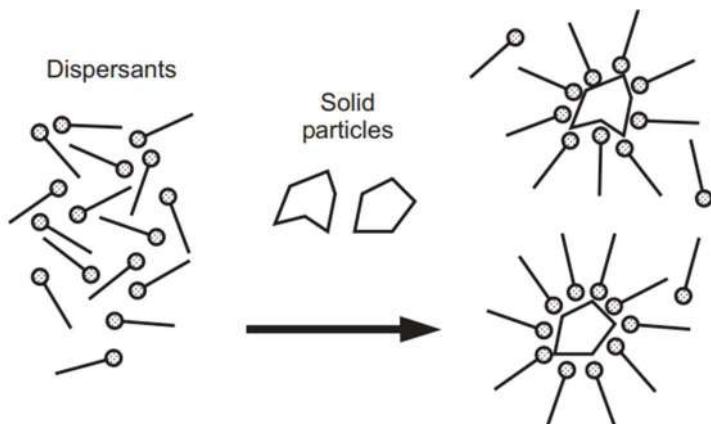
Portanto, é esperado que a distinção entre o perfil lipídico entre a palma e a soja resultará em diferenças de performance quando aplicada ao lubrificante. Segundo Rudnick, 2009, é esperado que conforme há o aumento do teor de ácidos oleicos, maior é a estabilidade oxidativa do óleo vegetal.

3.3. ADITIVOS PARA LUBRIFICANTES

Os lubrificantes são compostos majoritariamente por óleos básicos, que representam a maior parte do volume, e por aditivos químicos, que, embora constituam uma fração menor, são essenciais para garantir o desempenho adequado do produto. A presença de aditivos é fundamental para conferir propriedades específicas aos lubrificantes, permitindo que atendam às crescentes demandas das aplicações automotivas e industriais. A ausência de estabilizadores resultaria em degradação acelerada dos lubrificantes, principalmente por oxidação, comprometendo severamente sua funcionalidade. De tal maneira, o presente capítulo visa aprofundar em cada um dos diferentes tipos de aditivos presentes nos lubrificantes.

Os detergentes e dispersantes são aditivos frequentemente utilizados em conjunto devido à sua capacidade de atuar como agentes de limpeza no sistema lubrificante. A função principal desses aditivos, ilustrado na figura abaixo (figura 5) é manter dispersos os detritos de combustão insolúveis e os produtos de oxidação do óleo, evitando a formação de depósitos que podem ser prejudiciais aos componentes (RUDNICK, 2009). De maneira geral, são utilizados para minimizar depósitos de verniz em condições de alta temperatura, enquanto os dispersantes atuam principalmente na prevenção de depósitos de borra em baixas temperaturas. Essa ação ocorre pela solubilização ou suspensão de contaminantes, tornando-os inofensivos ao sistema (MANG, 2007). Como consequência, há prolongamento da vida útil do motor e redução nas emissões.

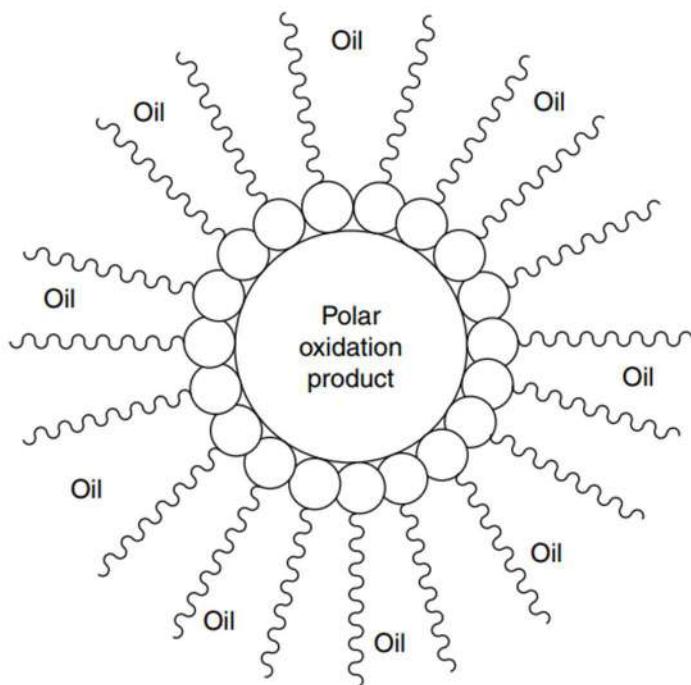
Figura 5 – Funcionamento dos dispersantes



Fonte: Adaptado de Mang, 2007.

Os detergentes são compostos por hidrocarbonetos de cadeia longa com extremidades polares, sendo que a extremidade polar contém geralmente um íon metálico, como cálcio, magnésio ou sódio. Sua estrutura é formada por uma cauda liofílica, responsável pela solubilidade no óleo, e uma cabeça polar, onde se localiza o metal. A Figura 6, demonstra a interação e a estrutura dos compostos detergentes.

Figura 6 – Suspensão, pela ação do detergente, de produtos polares oriundos da oxidação



Fonte: Adaptado de RUDNICK, 2009.

Entre os exemplos mais comuns destacam-se os sulfonatos, que podem ser neutros ou superbásificados, sendo estes últimos amplamente empregados devido à sua elevada capacidade de neutralização de ácidos. Já os dispersantes são compostos não metálicos, classificados como “ashless”, ou seja, livres de cinzas. Sua polaridade decorre da presença de átomos como oxigênio, fósforo ou nitrogênio, enquanto a cauda hidrocarbonada garante sua solubilidade no meio oleoso.

Os dispersantes apresentam-se em diferentes classes químicas, como succinimidas, ésteres de succinato, e compostos fosforados. Frequentemente, sua síntese envolve a utilização de poli-isobutileno como unidade estrutural de base. Esses aditivos possuem ampla aplicação, especialmente em óleos de motor, fluidos de transmissão, lubrificantes de engrenagem e óleos hidráulicos. Além disso, devido à sua natureza surfactante, podem influenciar a formação e estabilidade de emulsões e espumas. Em óleos destinados a motores diesel marítimos, que operam com combustíveis de alto teor de enxofre, os detergentes superbásificados são indispensáveis, atuando tanto na manutenção da limpeza quanto na neutralização dos ácidos provenientes da combustão. (MORTIER; ORSZULIK, 1999).

No que diz respeito à oxidação dos lubrificantes, sendo ele um dos principais fatores de degradação, podendo ocasionar corrosão, formação de depósitos (como borras e vernizes), alterações na viscosidade e perda das propriedades elétricas, dada a remoção dos antioxidantes naturais durante o processo de refino dos óleos básicos minerais torna necessária a adição de antioxidantes sintéticos às formulações. Esses aditivos atuam interrompendo as reações em cadeia da oxidação, por meio da neutralização de radicais livres, como radicais alquilperoxi ($\text{ROO}\cdot$) e hidroperóxidos (ROOH), bem como pela decomposição dos hidroperóxidos formados (MANG, 2007).

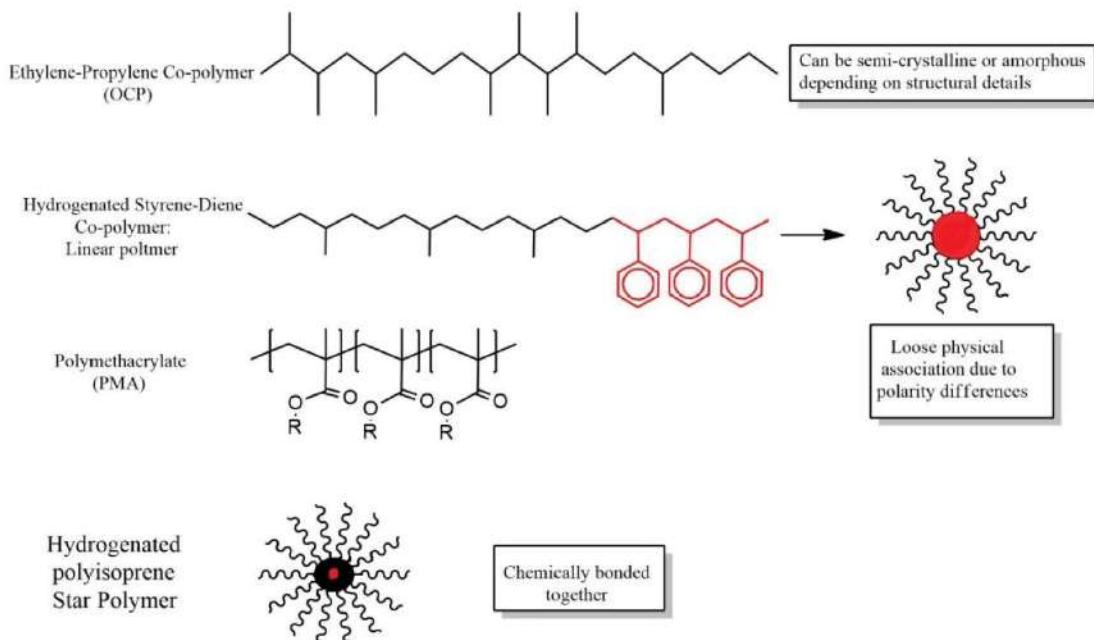
As principais aplicações dos antioxidantes abrangem óleos industriais, óleos de motor, óleos de turbina e lubrificantes para guias. É importante destacar que alguns antioxidantes podem apresentar limitações, como tendência à formação de depósitos em altas temperaturas, volatilidade, agressividade a materiais de vedação ou incompatibilidade com outros aditivos presentes na formulação. (MORTIER; ORSZULIK, 1999).

Outro tipo de aditivo comumente utilizado em formulações automotivas são os modificadores de viscosidade. Os modificadores de viscosidade, também conhecidos como melhoradores de índice de viscosidade (IV), são polímeros adicionados e diluídos em óleos básicos com o objetivo de garantir que o lubrificante mantenha sua viscosidade adequada em uma ampla faixa de temperaturas. Esses aditivos aumentam a viscosidade de forma mais significativa em altas temperaturas do que em baixas, promovendo um

comportamento reológico mais estável. Além disso, eles influenciam o desempenho do óleo sob condições de alto cisalhamento, sendo que a perda de viscosidade pode ocorrer tanto de forma temporária, por afinamento reversível, quanto de maneira permanente, devido à ruptura das cadeias poliméricas. Os modificadores de viscosidade são constituídos por polímeros sintéticos, como polimetacrilatos (PMA), copolímeros de olefina (OCP) e polímeros hidrogenados de estireno-dieno (MANG, 2017). Esses aditivos são amplamente empregados na formulação de óleos de motor e sua seleção depende dos requisitos de estabilidade ao cisalhamento da aplicação específica. A figura 7 ilustra a estrutura molecular dos polímeros mais utilizados no mercado como melhoradores de índice de viscosidade.

Em comparação com fluidos de transmissão automática, sistemas hidráulicos ou transmissões de eixo, os óleos de motor são menos exigentes em termos de resistência ao cisalhamento. Além disso, esses polímeros podem ser formulados para desempenhar funções adicionais, como atuar como dispersantes ou redutores do ponto de fluidez. Contudo, sob condições severas, podem contribuir para a formação de depósitos no motor.

Figura 7 – Diferentes tipos de polímeros melhoradores de índice de viscosidade.



Fonte: Adaptado de KHALAFVANDI, 2021

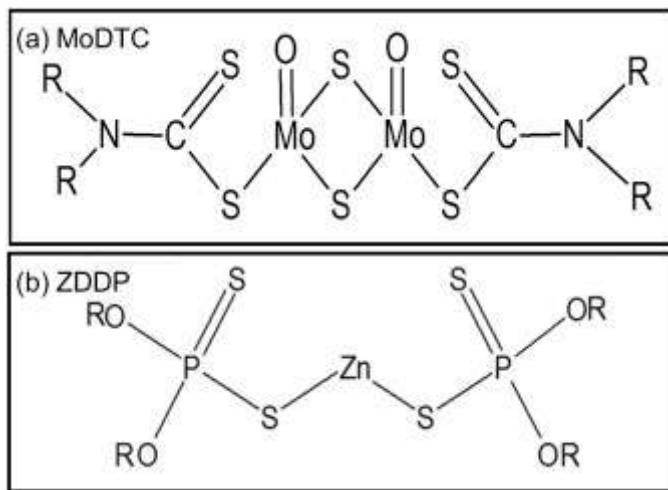
Quanto a proteção e redução de atrito das partes metálicas dos motores tem-se os modificadores de fricção, promovendo economia de combustível e melhorando a eficiência dos sistemas. Quando dissolvidos no óleo, suas moléculas são atraídas pelas superfícies metálicas, formando uma camada adsorvida que proporciona uma interface de fácil cisalhamento.

O mecanismo de ação dos modificadores de fricção envolve uma cabeça polar, que possui alta afinidade pelas superfícies metálicas, e uma longa cauda hidrocarbonada, que permanece solubilizada no óleo. As moléculas se organizam perpendicularmente à superfície, formando multicamadas coesas estabilizadas por forças intermoleculares. (MANG, 2017)

Os modificadores de fricção são compostos por moléculas lineares, contendo cadeias de hidrocarbonetos com, no mínimo, dez átomos de carbono, e uma cabeça polar funcional. Entre os grupos polares eficazes destacam-se ácidos carboxílicos, ácidos fosfóricos, além de derivados de aminas e amidas. Compostos oxigenados, como ésteres e álcoois, também são empregados devido à sua capacidade de melhorar a oleosidade.

O ditiofosfato de molibdênio (MoDTC) é um exemplo de modificador de fricção altamente eficiente, conhecido por sua contribuição na economia de combustível.

Figura 8 – Estrutura molecular de dois modificadores de atrito vastamente utilizados



Fonte: Adaptado de OKUBO, 2020

Esses aditivos possuem aplicação em motores, onde proporcionam melhoria no consumo de combustível, além de atuarem como agentes de lubrificidade em combustíveis diesel com baixo teor de enxofre, protegendo as bombas de alta pressão. Também são empregados em óleos para guias (*slideways*), onde previnem o atrito adesivo. Contudo, ressalta-se que pode ocorrer antagonismo entre modificadores de fricção e aditivos de extrema pressão (EP) à base de enxofre e fósforo, o que pode levar a movimentos irregulares nas superfícies lubrificadas.

Os aditivos antidesgaste (AW) e de extrema pressão (EP) são fundamentais para proteger superfícies metálicas em condições em que o filme de lubrificante hidrodinâmico é insuficiente. Aditivos AW são projetados para cargas moderadas e intermitentes, enquanto os EP são destinados a proteger sob cargas elevadas, choques ou deslizamentos contínuos. O mecanismo de proteção desses aditivos envolve a formação de filmes protetores nas superfícies metálicas por meio de reações triboquímicas, que resultam em uma camada superficial capaz de prevenir a soldagem e o desgaste severo. Embora esse processo envolva um tipo de desgaste químico controlado, ele é benéfico para evitar falhas catastróficas (MANG, 2017).

Outro tipo de aditivo utilizado tanto em formulações automotivas quanto industriais são os redutores do ponto de fluidez, conhecidos como *pour point depressants* (PPDs). Esses são aditivos essenciais para assegurar que os lubrificantes mantenham sua fluidez em temperaturas reduzidas (RUDNICK, 2009). Esses compostos atuam inibindo a formação e o crescimento de cristais de parafina, que poderiam comprometer a circulação do óleo em ambientes frios. De natureza polimérica, os PPDs podem estar incorporados na própria estrutura de alguns melhoradores de IV, como os polimetacrilatos, ou ser adicionados separadamente à formulação. Sua aplicação é indispensável em lubrificantes utilizados em climas frios, onde se busca garantir a partida a frio e a adequada circulação do óleo.

Por fim, os demulsificantes e antiespumantes são aditivos voltados ao controle de problemas relacionados à presença de água e à formação de espuma nos lubrificantes. Os demulsificantes promovem a separação da água, facilitando a quebra de emulsões, enquanto os antiespumantes reduzem tanto a formação quanto a estabilidade da espuma. O mecanismo de ação desses aditivos baseia-se na desestabilização das interfaces formadas por surfactantes presentes no óleo, como detergentes, dispersantes e melhoradores de IV. A presença de emulsões ou de espuma pode prejudicar seriamente a lubrificação, seja por bloquear dutos, seja por reduzir a quantidade de óleo disponível na zona de contato (RUDNICK, 2009).

A maioria dos pacotes de aditivos fornecidos pelas principais empresas do setor é desenvolvida especificamente para óleos minerais. Mesmo aqueles direcionados aos óleos vegetais utilizam uma base química originalmente formulada para derivados de petróleo. Além disso, os veículos (carriers) utilizados nos diferentes componentes geralmente são de origem petrolífera e, ao se formular um pacote multicomponente, uma porcentagem significativa de petróleo acaba sendo incorporada. Isso reduz a biodegradabilidade e eleva a toxicidade do fluido final, contrariando assim o objetivo principal do produto (RUDNICK, 2009).

3.4. NORMAS ATUAIS DE MERCADO

No setor automotivo, o desenvolvimento e a comercialização de produtos técnicos, como os óleos lubrificantes, são fortemente influenciados por normas e especificações técnicas elaboradas por órgãos nacionais e internacionais. Esses referenciais normativos asseguram a padronização da qualidade, o desempenho adequado dos produtos, a segurança dos usuários e a proteção dos sistemas mecânicos, além de contribuírem para a redução de impactos ambientais.

Entre os principais organismos internacionais de normatização destaca-se o *American Petroleum Institute* (API), responsável por classificar os níveis de desempenho de lubrificantes para motores, e a *International Lubricant Standardization and Approval Committee* (ILSAC), que atua na definição de padrões de desempenho técnico e eficiência energética em conjunto com montadoras norte-americanas e japonesas. No âmbito europeu, a *Association des Constructeurs Européens d'Automobiles* (ACEA) define requisitos técnicos específicos para veículos comercializados naquele continente. Esses órgãos estabelecem critérios que norteiam os testes laboratoriais e de campo exigidos para a homologação dos lubrificantes. Contudo, as normas elaboradas por esses órgãos dominam o cenário mundial de performance de óleos lubrificantes.

Outra norma extremamente importante definida pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), é a SAE J300, norma que determina os limites de aceitação para a classificação do grau da viscosidade de um lubrificante automotivo multiviscoso.

Os óleos multiviscosos devem atender a duas especificações de viscosidade, por isso seu grau de viscosidade é composto por dois números, por exemplo 10W-40: o “10W” indica a viscosidade em baixa temperatura (“Winter”) e o “40” representa a viscosidade em alta temperatura (“Summer”). Atualmente, a maioria dos óleos de motor automotivo são multiviscosos, enquanto aqueles de uso restrito, como em motores usados sazonalmente, por exemplo, cortadores de grama, são frequentemente monoviscosos. Embora os dois números informem o grau SAE de viscosidade, o índice de viscosidade revela a variação da viscosidade em função da temperatura. A Tabela 2 demonstra os

requisitos mínimos para classificação das viscosidades SAE 5W-30 e SAE 15W-40 quanto a norma SAE J300.

Tabela 2 – SAE J300 para 5W-30 e 15W-40

SAE	ASTM D5293, máx	ASTM D4684, máx	ASTM D445	ASTM D5481 (150 °C), Mín.)
0W	6200 a - 35 °C	60 000 a -40 °C	≥ 3.8	-
5W	6600 a - 30 °C	60 000 a -35 °C	≥ 3.8	-
10W	7000 a - 25 °C	60 000 a -30 °C	≥ 4.1	-
15W	7000 a - 20 °C	60 000 a -25 °C	≥ 5.6	3.7
20W	9500 a - 15 °C	60 000 a -20 °C	≥ 5.6	3.7
25W	13 000 a - 10 °C	60 000 a -15 °C	≥ 5.6	3.7
8	-	-	4.0 – <6.1	≥ 1.7
12	-	-	5.0 – <7.1	≥ 2.0
16	-	-	6.1 – <8.2	≥ 2.3
20	-	-	6.9 – <9.3	≥ 2.6
30	-	-	9.3 – <12.5	≥ 2.9
40	-	-	12.5 – <16.3	≥ 3.5 (para 0W-40, 5W-40, 10W-40) ≥ 3.7 (para 15W-40, 20W-40, 25W-40)
50	-	-	16.3 – <21.9	≥ 3.7
60	-	-	21.9 – <26.1	≥ 3.7

Fonte: SAE J300, elaboração própria.

Neste contexto, a combinação de requisitos para um óleo SAE 5W-30, por exemplo, é dada pela combinação de valores da linha “5W”, medindo as propriedades físico-químicas à frio, com a linha “30”, propriedades físico-químicas à quente.

A API (American Petroleum Institute) é uma instituição norte-americana que atua como referência técnica para o setor de petróleo e gás, sendo responsável pela elaboração de normas e especificações amplamente utilizadas pela indústria global. No segmento de lubrificantes automotivos, a API estabelece critérios de desempenho para óleos de motor por meio do seu sistema de licenciamento e certificação, o que assegura a qualidade e a compatibilidade dos produtos com os requisitos dos motores modernos (API, 2020).

A especificação API SP, introduzida em abril de 2020, representa uma das mais recentes categorias de desempenho para lubrificantes destinados a motores a gasolina, substituindo e superando as exigências da categoria anterior, API SN. Desenvolvida em conjunto com a ILSAC (International Lubricants Standardization and Approval Committee), a API SP visa atender às crescentes demandas por maior eficiência energética, proteção contra pré-ignição em baixa rotação (LSPI – *Low-Speed Pre-Ignition*), controle de depósitos em turbocompressores e aumento da durabilidade dos componentes internos dos motores, como correntes de comando. Complementarmente, a norma ILSAC GF-6 foi dividida em duas subcategorias: GF-6A e GF-6B, sendo ambas lançadas simultaneamente à API SP. A categoria GF-6A é compatível com viscosidades SAE 0W-20, 5W-20, 5W-30 e 10W-30, mantendo retrocompatibilidade com as categorias anteriores. Já a GF-6B, específica para a viscosidade SAE 0W-16, foi desenvolvida para atender motores que operam com baixíssimas perdas por atrito e exigem lubrificantes de ultrabaixa viscosidade, não sendo retrocompatível com especificações anteriores (ILSAC, 2019).

Ambas as normas incorporam uma nova bateria de testes, incluindo o *Sequence IX* para proteção contra *LSPI*, o *Sequence X* para controle de depósitos em pistões sob alta temperatura e o *Chain Wear Test* para avaliação do desgaste em correntes de comando. Esses ensaios refletem a evolução dos motores modernos, especialmente os de injeção direta e sobrealimentados, que impõem severas condições de operação aos lubrificantes.

A introdução da API SP e da ILSAC GF-6 marca um avanço significativo na normatização de desempenho dos óleos lubrificantes, promovendo não

apenas maior proteção ao motor, mas também contribuindo para a redução do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes, alinhando-se às diretrizes globais de sustentabilidade e eficiência energética (API, 2020).

Além das normas voltadas a motores ciclo Otto, como a API SP, o American Petroleum Institute (API) também estabelece classificações específicas para lubrificantes destinados a motores ciclo Diesel, amplamente utilizados em veículos comerciais pesados, máquinas agrícolas e equipamentos de construção. Entre essas classificações, a especificação API CK-4, lançada em 2016, representa um marco na evolução dos lubrificantes de alto desempenho para aplicações severas.

Com a implementação da norma Euro VI (Regulamento Europeu 595/2009), diversas mudanças foram incorporadas às regulamentações para veículos pesados (HDVs) e seus motores, incluindo a adoção de um ciclo mais representativo para testes em bancada, o Ciclo Transiente Mundial Harmonizado para Veículos Pesados (WHTC), além da exigência de testes veiculares em condições reais de uso com o uso de Sistemas Portáteis de Medição de Emissões (PEMS) e da verificação da Conformidade em Uso (ISC). Desde então, a norma Euro VI passou por atualizações graduais, buscando tornar os testes em estrada mais representativos do uso real dos veículos e promover uma maior harmonização com os ensaios em bancada, incluindo a maioria dos poluentes regulamentados em laboratório (GONZÁLEZ,2024).

Além disso, foram incluídos requerimentos nos sistemas de pós-tratamento de Diesel, sendo necessário reduzir o teor de enxofre para 10ppm. Os sistemas de pós-tratamento como o SCR, redução catalítica seletiva, e o DPF, filtro de particulados diesel, ambos são sensíveis à altos teores de enxofre (XIE, 2020).

Como reflexo dessa implementação, a norma API CK-4 foi desenvolvida para substituir as anteriores categorias API CJ-4, CI-4, e CH-4, mantendo compatibilidade com esses motores, mas oferecendo melhorias substanciais em aspectos como resistência à oxidação, controle de depósitos e fuligem, proteção contra desgaste, manutenção da viscosidade e estabilidade ao cisalhamento. Para atender aos requisitos da API CK-4, os lubrificantes devem passar por um

rigoroso conjunto de ensaios definidos pelo API e pela Engine Manufacturers Association (EMA). Esses testes incluem motores de diversas fabricantes como Cummins, Detroit Diesel, Mack, entre outras, e avaliam o desempenho dos lubrificantes em condições severas de operação, incluindo longos períodos de uso, temperaturas elevadas e presença de contaminantes. A categoria também prevê o uso de óleos com viscosidade reduzida sem comprometer a proteção do motor.

Os limites físico-químicos aplicáveis para os níveis de desempenho SAE 5W-30 API SP/ILSAC GF-6 e SAE 15W-40 API CK-4 serão apresentados junto aos resultados dos demais ensaios nas tabelas 6 e 7.

No Brasil, a responsabilidade pela adaptação e aplicação dessas diretrizes recai sobre a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como órgão oficial de normalização no país, a ABNT atua na elaboração, publicação e revisão de normas técnicas que asseguram a conformidade dos produtos com as exigências nacionais. No caso dos óleos lubrificantes automotivos, a ABNT estabelece normas que contemplam critérios como viscosidade, desempenho em motores, métodos de ensaio, rotulagem e classificação de aplicação.

A atuação da ABNT é fundamental para garantir que os lubrificantes comercializados no país atendam tanto às exigências técnicas das fabricantes de veículos quanto aos requisitos legais determinados por órgãos reguladores, como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A existência de normas técnicas bem definidas facilita o controle da qualidade, a fiscalização do mercado e a competitividade entre os fabricantes, promovendo segurança, desempenho e sustentabilidade no setor automotivo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas matérias-primas com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e o desempenho de formulações de lubrificantes automotivos a partir de composições híbridas. Utilizou-se óleo mineral rerefinado classificado como Grupo II, segundo a classificação da API, com viscosidade cinemática de 6 cSt a 100 °C, e óleo básico do Grupo III, com viscosidade de 4 cSt a 100 °C, ambos amplamente empregados em formulações de alto desempenho devido à sua estabilidade térmica e baixo teor de impurezas.

Adicionalmente, foram incorporados óleos vegetais refinados de origem brasileira, sendo eles óleo de palma e óleo de soja, com o intuito de avaliar a introdução de fontes renováveis à matriz lubrificante.

Para assegurar o atendimento às exigências das categorias de desempenho visadas, foram utilizados pacotes de aditivos adquiridos de fornecedores consolidados no mercado, criteriosamente selecionados com base na sua compatibilidade com as propriedades físico-químicas dos óleos básicos empregados. Tais pacotes são compostos por aditivos dispersantes, redutores de ponto de fluidez, antioxidantes e anticorrosivos clássicos, amplamente utilizados em formulações automotivas comerciais, proporcionando proteção contra a degradação térmica, oxidação e corrosão, além de manter a estabilidade da formulação em diferentes faixas de temperatura.

Matérias-primas utilizadas:

- Óleo mineral rerefinado – Grupo II (6 cSt a 100 °C) (origem: nacional)
- Óleo básico – Grupo III (4 cSt a 100 °C) (origem: importado)
- Óleo de palma refinado (origem: Brasil)
- Óleo de soja refinado (origem: Brasil)
- Pacotes de aditivos comerciais contendo:
 - Aditivos dispersantes
 - Aditivos redutores de ponto de fluidez
 - Antioxidantes
 - Aditivos anticorrosivos

4.2. METODOLOGIA

Para a realização das formulações a seguir, todos os itens foram adicionados de acordo com o seu percentual mássico indicado. Cada pacote de aditivos contém em sua descrição uma taxa de dosagem em percentual mássico % para obtenção do nível de desempenho esperado. A preparação das amostras de lubrificante foi realizada sob condições ambiente, nas quais foram monitorados parâmetros como temperatura e velocidade de agitação, com o objetivo de assegurar a homogeneidade das misturas.

Utilizando ferramentas para formulação de óleos de motor automotivo para veículos pesados (*Heavy Duty Motor Oil - HDMO*) e para veículos leves (*Passenger Car Motor Oil - PCMO*, foram desenvolvidos sete conjuntos de formulações para a realização deste estudo. Todas as formulações foram elaboradas utilizando os óleos básicos e os pacotes de aditivos comerciais descritos no item anterior, selecionados de forma a atender aos requisitos de desempenho estabelecidos pelas especificações SAE 5W-30, API SP/ILSAC GF-6A, para motores ciclo Otto de veículos leves, e SAE 15W-40, API CK-4, para motores ciclo Diesel de serviço pesado. Para avaliar o efeito diferencial da incorporação de óleos vegetais de soja e de palma em lubrificantes automotivos, desenvolveram-se sete formulações cujas siglas indicam a composição básica e a adição percentual dos insumos, ambas em % mássio. A seguir, explica-se o critério de nomenclatura adotado:

As formulações destinadas a motores Diesel de serviço pesado utilizam como referência a mistura totalmente mineral denominada HD 100, na qual 100 % do óleo básico pertence ao Grupo II, associado a um pacote de aditivos comumente empregado em lubrificantes CK-4 conforme API. Para investigar o impacto dos óleos vegetais, substituiu-se 10 % do óleo mineral por óleo de soja (resultado: HD SOY10) e, de modo análogo, por óleo de palma (HD PA10), mantendo-se o pacote aditivo e o restante da base mineral.

Nas formulações para motores de veículos de passeio, adotou-se como referência uma mistura 100 % Grupo III denominada PC 100, formulada para atender aos requisitos API SP/ILSAC GF-6A SAE 5W-30. A partir dessa base,

avaliou-se a inclusão de 10 % de óleo de soja (PC SOY10) e de palma (PC PA10), conservando o mesmo pacote de aditivos.

Para testar a hipótese de utilização de óleo refinado como base principal em lubrificantes automotivos, iniciou-se a avaliação por meio de uma formulação composta exclusivamente por óleo de soja. Essa escolha decorreu da ampla disponibilidade desse insumo no mercado nacional e da semelhança de sua viscosidade cinemática a 100 °C com a dos óleos básicos habitualmente empregados em formulações multiviscosas. Por fim, foi testada uma formulação inteiramente vegetal, composta por 100 % de óleo de soja refinado (PC SOY100), uma vez que a viscosidade cinemática a 100 °C dos óleos de soja e de palma coincide com a faixa requerida pela classificação SAE. Com essa base, foi possível verificar a viabilidade técnica de adoção do óleo vegetal em concentrações máximas, antes de se proceder aos ensaios comparativos com misturas parciais de soja e palma.

Abaixo a tabela 3, com intuito de resumir as 7 formulações propostas:

Tabela 3 – Formulações Automotivas Avaliadas

Amostras	HD 100	HD	HD	PC	PC	PC	PC
	SOY10	PA10	100	SOY10	PA10	SOY100	
Óleo de Palma	–	–	10%	–	–	10%	–
Óleo de Soja	–	10 %	–	–	10%	–	80-90 %
Óleo Mineral	–	–	–	–	–	–	–
Pacote de Aditivos	–	–	–	–	–	–	10-20 %
Pacote de Aditivos + Óleo Base Grupo II	100 %	90 %	90 %	–	–	–	–

Pacote de Aditivos + Óleo Base Grupo III	–	–	–	100 %	90 %	90%	–
-------------------------------------------------	---	---	---	-------	------	-----	---

Todas as formulações descritas na Tabela 2 foram avaliadas de acordo com os métodos padrão da ASTM para os ensaios de bancada exigidos pela especificação API, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação de ensaios avaliados para óleos de motor

Propriedade Avaliada	Método	Descrição
Viscosidade Cinemática	ASTM D445	Determina a viscosidade em 40°C e 100°C.
Viscosidade Aparente CCS (Cold Cranking Simulator)	ASTM D5293	Determina a viscosidade aparente de óleos de motor a baixa temperatura.
Determinação da Tensão de Escoamento e da Viscosidade Aparente (MRV)	ASTM D4684	Determina a viscosidade aparente de óleos de motor a baixa temperatura.
Viscosidade Aparente à alta temperatura e cisalhamento	ASTM D5481	Determina a viscosidade aparente de óleos de motor a alta temperatura
Índice de Viscosidade (IV)	ASTM D2270	Calcula o IV a partir dos dados de viscosidade.

Ponto de Fulgor (Cleveland)	ASTM D92	Mede a temperatura mínima de emissão de vapores inflamáveis.
Ponto de Fluidez	ASTM D97	Determina a menor temperatura na qual o lubrificante ainda flui.
Número Base Total (TBN)	ASTM D2896	Mede a capacidade de neutralização de ácidos.
Número Ácido Total (TAN)	ASTM D974	Determina o teor de acidez do óleo.
Formação de Espuma	ASTM D892	Avalia a tendência de formação e estabilidade de espuma em três temperaturas.
Estabilidade à Oxidação (sob pressão)	ASTM D6186	Mede a resistência à oxidação sob condições aceleradas.
Estabilidade ao Cisalhamento (KRL)	ASTM D2893	Avalia a perda de viscosidade devido ao cisalhamento.
Análise de Elementos (Espectrometria ICP)	ASTM D5185	Mede o teor de metais (como Zn, P, Ca, Mg, etc.) no lubrificante.
<i>Perda por evaporação (NOACK)</i>	ASTM D5800	Avaliação da perda de fração de óleo por evaporação

Após a caracterização das misturas apresentadas na Tabela 3, foi dado início à avaliação de sua qualidade e desempenho em conformidade com as normas vigentes, conforme estabelecido no item 2.4 - NORMAS AUTOMOTIVAS do capítulo de 2 – REFERENCIAL TEÓRICO. Por meio desses ensaios, tornou-se possível analisar o potencial de aplicação e os impactos decorrentes do uso de óleos de soja e de palma em formulações automotivas atuais.

5. RESULTADOS

Seguindo a ordem da metodologia, foi realizada a caracterização dos óleos de soja e palma refinados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização dos óleos básicos

Ensaio	Método	Óleo	Óleo	Resultado	Resultado
		Básico	básico	para Soja	para
		Grupo II	Grupo III ^a	Palma	
Visc.Cinemátic a à 40°C	ASTM D445	42 cSt	32 cSt	31,57 cSt	40,57 cSt
Visc.Cinemátic a à 100°C	ASTM D445	6,7 cSt	5,9 cSt	7,626 cSt	8,466 cSt
Índice de Viscosidade	ASTM 2270	114	128	225	192
Ponto de Fulgor	ASTM D92	246°C	240°C	330 °C	326°C
Ponto de Fluidez	ASTM D97	-16°C	-15°C	-14°C	-9°C

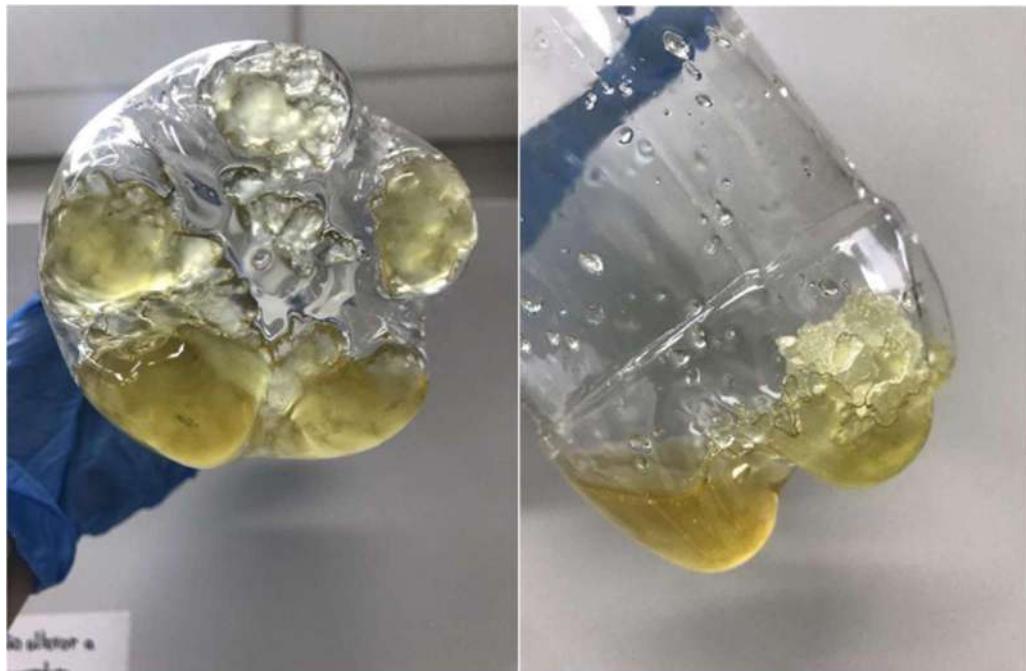
Com isso, prosseguimos para a análise de todas as misturas de óleos básicos e aditivos propostas na metodologia.

A fim de fortalecer a hipótese de viabilidade da utilização de óleos vegetais iniciamos a análise na formulação automotiva voltada para veículos de passeio no nível de desempenho API SP formulado com 100% de óleo de soja.

No entanto, a amostra PC SOY100, formulada exclusivamente com óleo de soja refinado e sem a presença de óleo básico mineral, não apresentou o mesmo comportamento. Conforme ilustrado na Figura 9, essa formulação

apresentou separação de fases visível, indicando ausência de miscibilidade e de homogeneidade.

Figura 9 – Formação de fases visíveis na formulação PC SOY 100



Fonte: Autor

A incompatibilidade observada na amostra PC SOY100 pode ser associada à solubilização do modificador de viscosidade, um copolímero de olefina (OCP) comumente utilizado em formulações de lubrificantes automotivos. A natureza polar do óleo vegetal pode reduzir a compatibilidade com aditivos poliméricos apolares, comprometendo a estabilidade da mistura final. Esses resultados sugerem que a formulação de lubrificantes à base de 100% de óleo vegetal pode exigir o uso de dispersantes específicos ou outros tipos de aditivos que garantam a estabilidade e a compatibilidade da mistura.

Em sequência, foram avaliadas as propriedades físico-químicas de todas as formulações restantes. Por fim, todas as misturas contendo combinações de óleos básicos minerais dos Grupos II e III com óleos vegetais refinados de soja e palma, resultaram em formulações homogêneas e estáveis, quando submetidas às condições padrão de mistura.

A caracterização físico-química das formulações desenvolvidas confirmou a viabilidade técnica da substituição parcial dos óleos básicos minerais dos Grupos II e III por matérias-primas renováveis, como os óleos de soja e de palma. Todas as amostras atenderam aos intervalos de viscosidade exigidos para suas respectivas classificações SAE. A Tabela 5 resume os principais resultados físico-químicos obtidos para as amostras de óleos *Heavy Duty*.

Os resultados não indicaram diferenças significativas na viscosidade cinemática a 100 °C entre as amostras. Contudo, observou-se um leve aumento no índice de viscosidade (VI) nas formulações HD SOY10 e HD PA10, em comparação com a formulação totalmente mineral (HD 100).

Essa tendência é coerente com as propriedades intrínsecas dos óleos vegetais utilizados: o índice de viscosidade medido para o óleo de soja foi de 225 e para o óleo de palma foi de 192, valores substancialmente superiores ao VI do óleo básico mineral do Grupo II, que é 115.

Também foi observada uma leve redução na viscosidade a 40 °C nas formulações contendo óleo vegetal. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de frações mais leves nos óleos vegetais, as quais também contribuíram para uma redução no ponto de fulgor em comparação com a amostra de referência (HD 100).

Conforme esperado, foram observadas diferenças no comportamento em baixas temperaturas. As formulações apresentaram melhor fluidez a temperaturas reduzidas, especialmente na amostra HD SOY10. Esse resultado está correlacionado com os valores de ponto de fluidez dos óleos básicos puros: - 14 °C para o óleo de soja, -9 °C para o óleo de palma e -16 °C para o óleo básico mineral.

Tabela 6 – Resultados físico-químicos obtidos para os óleos de motor *heavy duty*.

Amostra	Limite	HD 100	HD SOY10	HD PA10
SAE 15W-40 API CK-4				
Viscosidade Cinemática a 100°C				
Viscosidade Cinemática a 40°C				
HTHS	Mín. 3,7	4,21	4,28	4,27
Índice de Viscosidade	Reportar	143	152	149
Ponto de Fluidez	Máx.-27°C	-42°C	-39°C	-30°C
Ponto de Fulgor	Reportar	256°C	234°C	220°C
Viscosidade Cold Craking à -20 °C	Máx. 7000	5200	4400	5000
Número de Basicidade Total	Mín. 7	9.6	9.4	9.7
Número de Acidez Total	Reportar	0.3	0.3	0.3
MRV a -25 °C	Máx. 60000	16000	13000	21000
NOACK	Máx 13%	7.2%	6.9%	6.8%

Apesar da melhora no ponto de fluidez, o ensaio MRV (ASTM D4684) indicou um aumento considerável da viscosidade em baixas temperaturas nas formulações contendo óleo vegetal. Isso sugere que o depressor de ponto de fluidez (PPD) atualmente utilizado pode não ser totalmente compatível com a estrutura molecular da fração de óleo vegetal. Esses resultados indicam a necessidade de futuras otimizações no sistema de *PPD* para formulações com conteúdo significativo de bases renováveis.

Não foram encontradas diferenças mensuráveis nos parâmetros de TBN, TAN. Isso indica que o pacote de aditivos manteve sua funcionalidade, apesar da alteração nas propriedades do óleo básico. Esses resultados estão alinhados com estudos anteriores, os quais demonstram que a inclusão moderada de óleos vegetais não compromete o desempenho de sistemas de aditivos bem balanceados.

As formulações para aplicações em veículos de passeio seguiram a mesma lógica adotada para os lubrificantes de serviço pesado, incorporando 10% de óleo de soja ou de palma refinado na mistura de óleo básico Grupo III. As amostras avaliadas foram: PC 100 (totalmente mineral), PC SOY10 e PC PA10.

Não foram observadas variações significativas na viscosidade cinemática, TBN ou no índice de viscosidade (VI).

No entanto, em contraste com as amostras de serviço pesado (HD), o comportamento em fluxo a frio apresentou maior sensibilidade nas formulações para motores de veículos de passeio (PCMO). O aumento no ponto de fluidez foi mais acentuado, e as diferenças no desempenho do teste MRV foram significativas. Especificamente, a formulação PC PA10 falhou no teste MRV devido à solidificação em baixas temperaturas, sugerindo uma incompatibilidade entre o sistema atual de depressor de ponto de fluidez (PPD) e a estrutura molecular da mistura à base de óleo de palma.

Tabela 7 – Resultados físico-químicos obtidos para os óleos de motor para veículos de passeio.

Ensaios	Limite 5W- 30 API SP	PC 100	PC SOY10	PC PA10
Viscosidade Cinemática a 100°C	10 a 12,5	10.8 cSt	10.8 cSt	10.8 cSt
Viscosidade Cinemática a 40 °C	Reportar	63.5 cSt	65.6 cSt	63.3 cSt
HTHS	Mín. 2,9	3,1	3,19	3,267
Índice de Viscosidade	Reportar	166	155	162
Ponto de Fluidez	Máx. -27°C	-36°C	-33°C	-21°C
Ponto de Fulgor	Reportar	226°C	216°C	224°C
Viscosidade Cold Cranking a -30 °C	Máx. 6600	6000	6500	6700
Número Básico Total	Reportar	7.3	7.5	7.5
Número Ácido Total	Reportar	0.4	0.4	0.4
MRV a -35 °C	Máx. 60000	15.800	20000	Congelou
NOACK	Máx. 15%	6.7%	6.7%	6.3%

NOTA: A amostra PC SOY100 não foi testada quanto ao desempenho devido à falta de estabilidade da mistura, conforme discutido no início desta seção.

Esses resultados reforçam que as formulações PCMO, projetadas para atender a requisitos mais rigorosos de economia de combustível e desempenho em partidas a frio, são mais sensíveis às variações na estrutura do óleo básico e, portanto, exigem estratégias específicas de aditivação. A melhora na fluidez em baixas temperaturas com o uso de óleo de soja também foi mais evidente nas formulações PC em comparação às amostras HD, confirmando essa maior sensibilidade. Esse comportamento também pode ser atribuído ao perfil lipídico dos óleos vegetais avaliados. O óleo de palma apresenta concentrações elevadas de ácido palmítico, um ácido graxo saturado que tende a cristalizar em temperaturas mais alta, comprometendo a fluidez em condições frias.

Em contrapartida, o óleo de soja é rico em ácidos graxos insaturados (como o oleico e o linoleico), cujas cadeias menos rígidas retardam a cristalização de ceras e favorecem o escoamento do lubrificante em baixas temperaturas. Dessa forma, a distinta composição de ácidos graxos explica a melhor resposta ao frio observada nas formulações contendo óleo de soja.

Em relação à amostra PC SOY100, a falta de homogeneidade discutida anteriormente está alinhada com as observações da literatura e da prática comercial, apontada por Rudnick, 2009. Não foi identificado nas bases de dados e documentos técnicos consultados nenhum estudo que proponha um lubrificante automotivo de grau comercial utilizando 100% de óleo vegetal refinado como fluido base. Isso sugere que a miscibilidade e a estabilidade da formulação ainda são barreiras críticas para a substituição total de óleos minerais em aplicações de óleo de motor. Tais limitações costumam ser abordadas na literatura por meio do uso de ésteres quimicamente modificados ou co-solventes, que melhoram a solubilidade dos aditivos e a compatibilidade da mistura.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a substituição parcial dos óleos básicos minerais dos Grupos II e III por óleos de soja e palma refinados é tecnicamente viável na formulação de lubrificantes de alto desempenho para motores. As formulações com 10% de conteúdo vegetal não apresentaram degradação significativa nos principais parâmetros de desempenho, incluindo viscosidade, basicidade, corrosividade e compatibilidade com aditivos, tanto para aplicações de serviço pesado (API CK-4 SAE 15W-40) quanto para veículos de passeio (API SP/ILSAC GF-6A SAE 5W-30).

De forma particular, a falta de miscibilidade na formulação com 100% de óleo de soja reforça a importância do uso de co-solventes, dispersantes ou frações de óleos básicos esterificados em sistemas totalmente baseados em fontes renováveis.

Adicionalmente, o comportamento observado no teste MRV das formulações dedicadas para veículos automotivos leves contendo óleo de palma destacou a necessidade de melhorar a compatibilidade entre os depressores de ponto de fluidez e a composição do óleo básico.

Esses resultados preliminares oferecem uma base sólida para o desenvolvimento contínuo de tecnologias de lubrificantes *bio-based*, adaptadas às matérias-primas locais e às exigências de desempenho. Com trabalho contínuo de formulação científica e validação, os óleos vegetais brasileiros podem fazer parte de uma rota viável e escalável rumo à lubrificação automotiva sustentável.

7. SUGESTÕES

Por mais que representativos, ensaios físico-químicos por si só não são suficientes para garantir a viabilidade técnica do uso de diferentes óleos básicos. Para isso, faz-se necessário a análise aplicada diretamente em óleos de motor, também conhecidos como testes de motor. Esses testes são os responsáveis por garantir que o óleo funcionará como uma peça ideal para a gama de motores que o representa.

Visto que os testes de motor requerem alto investimento em capital para cada formulação testada, recomenda-se antes uma avaliação direcionada da estabilidade térmica utilizando Calorimetria Diferencial de Varredura sob Pressão (PDSC), método exigido para conformidade com os padrões da ACEA, além de avaliar diferentes aditivos e diferentes teores de componente renovável.

Este é considerado um ponto crítico no uso de óleos vegetais devido à conhecida sensibilidade desses materiais à oxidação em altas temperaturas. Paralelamente, devem ser realizados testes em dinamômetro e testes de campo para avaliar o desempenho real das formulações desenvolvidas.

8. REFERÊNCIAS

MORTIER, R. M.; ORSZULIK, S. T. (Ed.). *Chemistry and Technology of Lubricants*. 2. ed. Dordrecht: Springer-Science+Business Media, BV, 1999.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API Service Categories*. Washington, D.C., 2020. Disponível em: <https://www.api.org/products-and-services/engine-oil>.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Service Categories: CK-4. Washington, D.C., 2016. Disponível em: <https://www.api.org>. Acesso em: 10 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 22, de 10 de julho de 2014. Dispõe sobre a qualidade dos óleos lubrificantes. Disponível em: <https://www.gov.br/anp>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IBGE estima safra recorde em 2025 com 328,4 milhões de toneladas. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202505/estimativa-de-abril-indica-safra-recorde-de-328-4-milhoes-de-toneladas-em-2025>>.

ZAPPA. Capacidade de processamento de oleaginosas supera 72 milhões de tons em 2024 - Abiove. Disponível em: <<https://abiove.org.br/capacidade-de-processamento-de-oleaginosas-supera-72-milhoes-de-toneladas-em-2024>>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ASADAUSKAS, S.; PEREZ, J. M.; DUDA, J. L. Oxidative stability and antiwear properties of high oleic vegetable oils. *Lubrication Engineering*, v. 52, p. 877–882, 1996.

CHOWDARY, K. et al. A review of the tribological and thermophysical mechanisms of bio-lubricants based nanomaterials in automotive applications. *Journal of Molecular Liquids*, v. 339, p. 116717, out. 2021.

GHARBY, S. Refining Vegetable Oils: Chemical and Physical Refining. *The Scientific World Journal*, v. 2022, 11 jan. 2022.

FONSECA GONZÁLEZ, N. et al. Euro 7 proposal assessment of a Euro VI parallel hybrid electric bus. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 129, p. 104125, 6 mar. 2024.

LWART SOLUÇÕES AMBIENTAIS. *Lwart investirá R\$ 1 bilhão para ampliar rerefino de óleos lubrificantes*. Valor Econômico, [S.I.], 2025. Disponível em: <https://www.lwart.com.br/static/Lwart%20investir%C3%A1%20R%EF%BF%BD%201%20bi%20para%20ampliar%20rerefino%20de%20%C3%B3leos%20lubrificantes%20%20Empresas%20%20Valor%20Econ%C3%B4mico-45c4cfcb4ea0c0c61069e8cd7f591d2e.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MACHADO, A. F. de F. et al. Óleo de palma de alto oleico produzido no Brasil. In: Anais..., Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2018. Palavras-chave: GC-FID; padrão de identidade e qualidade; ácidos graxos.

MATOS, E. S. *Refino de petróleo: tecnologia e prática*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MOBARAK, H. M. et al. The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 34–43, 1 maio 2014.

API Groups I-V | NLGI. Disponível em: <<https://www.nlgi.org/glossary/api-groups-i-v>>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PIMENTEL, D. M. Estudo experimental da deposição de parafina sobre superfícies revestidas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2012

SILVA, C. E.; CARRÃO-PANIZZI, M. C.; MANDARINO, J. M. G.; OLIVEIRA, M. A.; LEITE, R. S.; OLIVEIRA, G. B. A.; MOREIRA, A. A.; SANTOS, H. M. C.; MÔNACO, A. P. A. Avaliação de ácidos graxos da soja: grão inteiro, casca, cotilédones e hipocótilo. In: **Anais...**, Embrapa Soja, 2010. Palavras-chave: avaliação de ácidos graxos; soja.

TEH, J. L. et al. Biolubricants from waste cooking oil: A review of extraction technologies, conversion techniques, and performance enhancement using

natural antioxidants. **Journal of Environmental Management**, v. 375, p. 124267–124267, 29 jan. 2025.

ILSAC – INTERNATIONAL LUBRICANT STANDARDIZATION AND APPROVAL COMMITTEE. *ILSAC GF-6A & GF-6B Specifications*. 2020. Disponível em: <https://www.ilsc.org/engine-oil>.

MORTIER, R. M.; ORSZULIK, S. T. (Ed.). *Chemistry and Technology of Lubricants*. 2. ed. Dordrecht: Springer Science+Business Media, BV, 2010.

Programa MOVER, 2025. Disponível em: <https://www.programa-mover.com/>

Mang, T., & Dresel, W. (Eds.). (2017). *Lubricants and Lubrication* (3rd ed.). Wiley-VCH.

SALIMON, J.; SALIH, N.; YOUSIF, E. Biolubricants: Raw materials, chemical modifications and environmental benefits. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 112, n. 5, p. NA-NA, 2010

FOX, N. J., & STACHOWIAK, G. W. (2007). Vegetable oil-based lubricants—A review of oxidation. *Tribology International*, 40(7), 1035–1046.

MAIMON, Dalia. Passaporte verde: gestão ambiental e competitividade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996.

KHALAFVANDI, Seyed Ali; PAZOKIAN, Muhammad Ali; FATHOLLAHI, Ehsan. The Investigation of Viscometric Properties of the Most Reputable Types of Viscosity Index Improvers in Different Lubricant Base Oils: API Groups I, II, and III. *Lubrication Science*, 2021.

EM, L. **Mercado Brasileiro de lubrificantes bate recorde histórico crescendo 2,3% em 2024**. Disponível em: <<https://portallubes.com.br/2025/02/mercado-brasileiro-de-lubrificantes-bate-recorde>>. Acesso em: 18 jul. 2025.

OKUBO, H.; TADOKORO, C.; SASAKI, S. *In Situ* Raman-SLIM Monitoring for the Formation Processes of MoDTC and ZDDP Tribofilms at Steel/Steel Contacts under Boundary Lubrication. **Tribology Online**, v. 15, n. 3, p. 105–116, 31 maio 2020.

RITTNER, H. Tecnologia das Matérias Graxas. Editora Herman Ritner. São Paulo, 2002.