

AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E TÉRMICA DE LUBRIFICANTES HÍBRIDOS FORMULADOS COM ÓLEO MINERAL HIDRÁULICO E ÓLEO DE SOJA

Witney Karen Moraes Costa¹, Jadson Lucas Alcântara Nascimento Ferreira², Luciana Sobreira Carvalho³, Larissa Costa de Menezes³, Janyeid Karla Castro Souza², Maira Silva Ferreira²

¹*Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil (witney.moraes@discente.ufma.br)*

²*Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil*

³*Laboratório de Análises e Pesquisa em Química Analítica de Petróleo e Biocombustíveis, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Brasil*

Resumo: Este estudo avalia a viabilidade de lubrificantes híbridos de óleo mineral e soja. Ensaios indicam que misturas com até 20% de base vegetal atendem às especificações de viscosidade e massa específica da ANP e ISO VG. A soja elevou o ponto de fulgor, aumentando a segurança térmica, e agiu como clareador óptico, sendo uma alternativa ecológica viável..

Palavras-chave: lubrificante híbrido, óleo mineral, óleos vegetais, propriedades físico-químicas

INTRODUÇÃO

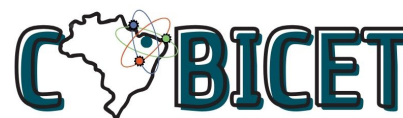
A transição para uma economia de baixo carbono, impulsionada pelo esforço global em mitigar as mudanças climáticas e preservar o meio ambiente, tem pautado o desenvolvimento industrial recente (Rissman *et al.*, 2020). O Brasil desempenha um papel de destaque nessa agenda devido ao avanço consolidado de suas políticas de energias renováveis, com destaque para a inserção em larga escala do etanol e do biodiesel na matriz energética (Santos *et al.*, 2021). Apesar desse pioneirismo, o setor nacional de lubrificantes ainda lida com um forte obstáculo estrutural: produção insuficiente de óleos básicos de alta performance. Como reflexo desse déficit produtivo, o país mantém uma severa dependência externa ao importar aproximadamente 741 mil metros cúbicos de óleo básico em 2025, um dos volumes mais expressivos já registrados historicamente (Belmiro, 2025). Nesse cenário, o aproveitamento de matérias-primas regionais surge como uma alternativa estratégica para reduzir essa vulnerabilidade econômica.

Segundo Gokarn e Kiran (2023), os lubrificantes atuam reduzindo o atrito, dissipando o calor e minimizando o desgaste entre superfícies em movimento relativo. Na formulação desses fluidos, o óleo básico de origem mineral, sintética ou vegetal constitui o componente majoritário, equivalente a aproximadamente 90% do volume total do produto acabado. O percentual restante corresponde aos

aditivos aplicados para melhorar ou conferir propriedades específicas ao meio. Embora essa proporção sofra variações de acordo com a aplicação final, a base lubrificante é o fator determinante para o comportamento físico-químico do fluido (Pichler *et al.*, 2023).

O emprego adequado desses fluidos é vital para assegurar a operação de sistemas sob condições de funcionamento extremas, como motores a combustão, sistemas de transmissão mecânica e sistemas hidráulicos industriais. Para cada aplicação, a seleção da base exige rigor, pois parâmetros como estabilidade térmica, resistência oxidativa e índice de viscosidade variam significativamente de acordo com a origem do óleo básico (Garcés; Martínez-Force; Salas, 2011; Murru; Badía-Laíño; Díaz-García, 2021; Woma *et al.*, 2019). Contudo, o consumo em larga escala de óleos minerais derivados de petróleo intensifica as pegadas ecológicas. Aproximadamente metade do volume global de resíduos de lubrificantes é descartada incorretamente no meio ambiente, seja por vazamentos, falhas no transporte ou descarte inadequado (Boichenko *et al.*, 2021). Devido à sua natureza fóssil, esses resíduos resistem à degradação biológica e apresentam alta toxicidade, comprometendo solos e recursos hídricos (Mekonnen; Aragaw; Genet, 2024).

Para atenuar esses impactos sem comprometer o desempenho dos sistemas, o desenvolvimento de lubrificantes híbridos surge como um caminho



viável. Essa estratégia consiste em formular misturas de bases minerais e vegetais, combinando a estabilidade mecânica dos derivados de petróleo com o apelo ecológico e renovável das biomassas. Diante disso, este estudo propõe a formulação e a caracterização de misturas binárias compostas por um óleo lubrificante mineral, voltado para sistemas hidráulicos industriais, e o óleo vegetal de soja (*Glycine max*).

A seleção do fluido hidráulico justifica-se pelo interesse em avaliar como esse produto, amplamente utilizado na transmissão de força em equipamentos industriais e agrícolas, se comporta ao ser misturado com um óleo vegetal. Por serem essenciais para os setores industrial e automotivo, esses fluidos demandam alternativas que unam eficiência técnica à redução do impacto ecológico. De forma complementar, a escolha do óleo vegetal utilizado considerou seu potencial desempenho teórico como lubrificante, avaliando a importância de suas características físico-químicas e sua ampla disponibilidade no território maranhense. Nesse contexto, a escolha do óleo de soja fundamenta-se em sua expressiva produção na região sul do estado, em sua alta viabilidade econômica e cadeia produtiva fortemente consolidada na fabricação de biodiesel. (Amorim *et al.*, 2023; Lima; Rodrigues; Oliveira, 2024; Pereira; Vieira, 2025). Assim, a união dessa biomassa com o óleo mineral configurou-se como uma escolha estratégica para o desenvolvimento das misturas propostas e fortalecimento econômico regional.

Com base nas caracterizações e ensaios disponíveis na literatura científica sobre o óleo de soja (Silva, 2009; Nieto Garzón, 2012; Almeida, 2012), este fluido destaca-se por uma estrutura molecular predominantemente composta por ácidos graxos insaturados de cadeia longa, como os ácidos oleico e linoleico. Essa constituição química reflete diretamente em seu comportamento térmico e reológico. No que se refere ao ponto de fulgor, o óleo de soja exibe uma segurança operacional notável e elevada estabilidade contra a degradação térmica, registrando valores expressivos na faixa de 325 °C (Chamonge, 2024), o que minimiza drasticamente os riscos de inflamabilidade em sistemas submetidos a condições extremas de temperatura. Em relação à viscosidade cinemática à 40 °C, os estudos apontam uma sutil variação a depender da origem e refino do fluido: Morais (2014) reporta valores entre 29,5 cSt e 34,71 cSt para o óleo integral, enquanto Dantas *et al.*, (2021) registram cerca de 27,3 cSt ao avaliarem a matriz residual. Esses parâmetros evidenciam que o fluido se enquadra de forma consistente nos limites exigidos para diversas aplicações industriais e formulações de biolubrificantes sem comprometer a fluidez do sistema. Por fim, a massa específica à 20

°C demonstra um comportamento altamente previsível e uniforme, com valores médios oscilando entre 0,915 g/cm³ e 0,922 g/cm³ (Santos, 2022), uma propriedade física crucial tanto para o cálculo hidráulico quanto para o monitoramento da homogeneidade em misturas binárias.

No entanto, a substituição integral das bases minerais por óleos vegetais puros apresenta limitações decorrentes, principalmente, de sua baixa estabilidade oxidativa sob altas temperaturas e de suas restritas propriedades de escoamento em climas frios (Olagunju *et al.*, 2022). Diante disso, o desenvolvimento de uma formulação híbrida (mineral-vegetal) justifica-se pela busca de um efeito sinérgico capaz de aliar o caráter ecológico da biomassa à resistência mecânica e estabilidade térmica do óleo mineral.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um lubrificante híbrido composto por óleo mineral hidráulico e óleo vegetal de soja, buscando uma alternativa de menor impacto ambiental que atenda aos critérios regulatórios vigentes. Para alcançar esse propósito, a pesquisa compreende a seleção fundamentada dessa fonte vegetal via literatura, o estudo do comportamento e da estabilidade termo-temporal das misturas em diferentes proporções e, por fim, a caracterização físico-química dos fluidos obtidos. Essa etapa experimental abrangerá a análise de parâmetros essenciais tais como viscosidade, massa específica, ponto de fulgor e cor ASTM, realizadas em conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos pela Resolução ANP Nº 911/2022 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis além de conformidade com as normas ASTM.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente nas bases CAPES, *ScienceDirect* e Google Acadêmico sobre as propriedades físico-químicas dos óleos vegetais para seleção da biomassa, bem como o levantamento das faixas operacionais de referência para óleos hidráulicos comerciais. Esta etapa forneceu uma base comparativa sólida para analisar se os resultados das formulações híbridas atendem aos padrões de mercado, avaliando a capacidade das misturas propostas em conciliar a redução do impacto ambiental com a preservação de sua qualidade técnica. O levantamento contemplou os parâmetros das normas ASTM para viscosidade cinemática, ponto de fulgor, massa específica e cor.

Os óleos base utilizados foram adquiridos no comércio local de São Luís, Maranhão. Para

constituir a base de origem fóssil, selecionou-se um fluido comercial representativo para transmissões hidráulicas, fabricado pela GT Oil sob a especificação TASA (Tipo A Sufixo A) pertencente ao Grupo I da *American Petroleum Institute* (API) caracterizado por ser um óleo mineral convencional obtido por refino de solventes, contendo baixo teor de saturados e índice de viscosidade moderado (GT OIL, 2022). Como fonte vegetal, empregou-se o óleo de soja refinado da marca Soya, produto da Bunge Alimentos, cuja composição padrão de mercado apresenta aditivos antioxidantes (tert-butil-hidroquinona) para garantir estabilidade na prateleira (Bunge Alimentos, 2025). Ambos os óleos foram utilizados conforme adquiridos, sem nenhum tratamento prévio.

A preparação das formulações binárias ocorreu com o auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,0001 g, garantindo a exatidão das frações mássicas planejadas. Ao todo, foram preparadas 11 misturas baseadas na relação percentual em massa (% m/m), estabelecidas em variações regulares de aproximadamente 10%. O sistema de codificação adotado seguiu a nomenclatura SXX-H, na qual o termo "S" designa o óleo de soja, "H" representa a base mineral hidráulica e o indicador "XX" representa a concentração em porcentagem da matéria-prima vegetal incorporada. O planejamento das amostras partiu do fluido S100-H, constituído integralmente por base vegetal (100% de soja) sem adição do óleo hidráulico (0%). Posteriormente, realizaram-se reduções gradativas e sistemáticas nas proporções, como ilustrado no sistema S90-H (90% de óleo de soja e 10% de óleo hidráulico), evoluindo de forma sequencial até atingir a amostra limite S00-H, composta exclusivamente por 100% de fluido hidráulico mineral.

Para compreender o comportamento das formulações sob diferentes condições operacionais e de armazenamento, realizou-se o monitoramento térmico e temporal de sistemas selecionados de misturas sob temperaturas de 5 °C, 25 °C e 50 °C, o que permitiu avaliar a resistência das interações entre a base mineral e vegetal, identificando possíveis fenômenos de separação de fases ou alterações físicas devido ao estresse térmico e ao envelhecimento natural.

O perfil físico-químico foi delineado por meio de quatro ensaios laboratoriais básicos: viscosidade cinemática, ponto de fulgor, massa específica e cor ASTM. Os ensaios foram estruturados de acordo com as diretrizes regulatórias vigentes na Resolução ANP N° 911/2022 (ANP, 2022).

A análise reológica foi avaliada via viscosidade cinemática a 40 °C em conformidade com a norma ASTM D445. Para realizar este ensaio, foi utilizado

um banho termostático VISCOBATH e tubos capilares de vidro modelo Cannon-Fenske de numeração 200 (cuja constante é 0,1). O procedimento de equilíbrio térmico envolveu o repouso do fluido durante 30 minutos antes da cronometragem do fluxo em triplicata, registrando o valor definitivo da viscosidade na unidade de mm²/s (cSt).

A estabilidade térmica sob risco de inflamação foi qualificada pelo ensaio de ponto de fulgor descrito conforme a norma ASTM D93. O ensaio foi conduzido em um equipamento automatizado Pensky-Martens operando em vaso fechado. Uma porção de 50 mL de amostra foi submetida a uma taxa de aquecimento constante sob aplicação periódica de uma chama piloto, até a detecção da combustão momentânea dos vapores, com os resultados registrados em graus Celsius (°C).

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a norma ASTM D1298. Utilizou-se um densímetro digital da marca Anton Paar, modelo DMA 4500 M, cujo funcionamento se baseia na oscilação mecânica de um tubo em U. Para esse ensaio, injetou-se um volume aproximado de 2 mL de cada mistura diretamente na célula de ensaio mantida a 20 °C, gerando leituras expressas em kg/m³.

Como última etapa, o aspecto visual foi quantificado pela análise de cor em conformidade com a norma ASTM D1500, o ensaio foi conduzido em um colorímetro Orbeco-Hellige fabricado pela Koehler. Essa etapa consistiu no confronto visual direto entre os fluidos acondicionados em tubos normatizados e padrões ópticos de vidro sob iluminação artificial branca, gerando um índice numérico que varia em ordem crescente de escurecimento de 0,5 a 8,0 (conforme ilustrado na Figura 1).

ASTM Color Chart

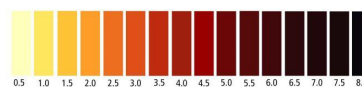


Figura 1. Escala de cor ASTM (Pitta *et al.*, 2021).

A fim de certificar o enquadramento regulatório das formulações desenvolvidas, os dados obtidos em laboratório foram comparados com as faixas de tolerância vigentes para as classes comerciais ISO VG 32, 46 e 68 na categoria HH (óleo puro), sob as diretrizes da norma ISO 11158 (ISO, 2009) e para as especificações descritas na Resolução ANP N° 911/2022 (ANP, 2022) cujos parâmetros estão detalhados na Tabelas 1.

Tabela 1 - Especificações Para Óleos

Óleos	Classificação	ν (cSt)	PF (°C)
Hidráulicos	VG 32	28,8 - 35,2	175
Minerais	VG 46	41,5 - 50,6	185
Puros ISO	VG 68	61,2 - 74,8	195
Básicos	RR-10	8 - 14	155
Rerrefinados	RR-30	26 - 32	200
do Grupo I	RR-40	36 - 46	215
ANP N°	RR-55	50 - 60	215
911/2022	RR-70	*	226

ν : Viscosidade cinemática a 40°C; PF: Ponto de fulgor mínimo; *Valor não especificado

Para ambas as especificações, os valores de massa específica ficam a critério do fornecedor. Entender claramente esses intervalos é fundamental para garantir testes confiáveis e classificar corretamente os fluidos híbridos formulados. A compreensão exata desses intervalos de conformidade constitui um requisito obrigatório para assegurar a confiabilidade dos testes e a correta classificação dos fluidos híbridos formulados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio de estabilidade térmica e de estocagem para as amostras, o monitoramento temporal revelou comportamentos distintos sob diferentes faixas de temperatura. Após a exposição por 4 horas sob refrigeração a 5°C, o fluido híbrido contendo óleo de soja apresentou uma redução em sua fluidez devido ao aumento natural da viscosidade em baixas temperaturas, porém manteve-se em estado líquido, sem sofrer congelamento ou cristalização. Essa resistência ao congelamento deve-se à predominância de ácidos graxos insaturados, oleico e linoleico, no óleo de soja (Solea; Georgescu; Deleanu, 2016).

Sob a temperatura de 25°C, simulando condições usuais de armazenamento, as misturas binárias mantiveram-se completamente homogêneas ao longo de 3 semanas, sem apresentar qualquer alteração visual ou sedimentação. Esse comportamento evidencia uma excelente compatibilidade termodinâmica e solubilidade mútua entre a base mineral e os triacilgliceróis da biomassa, garantindo que o lubrificante não perderá sua uniformidade durante a estocagem.

Por fim, quando submetidas ao estresse térmico a 50°C por 4 horas, as misturas também não apresentaram qualquer alteração visual ou separação de fases. Os sistemas permaneceram perfeitamente homogêneos e, como esperado devido ao efeito da temperatura sobre a energia cinética das moléculas, exibiram-se mais fluidos. Esse resultado indica que, mesmo sob temperaturas moderadamente elevadas típicas de operação industrial, a interação física entre as bases mineral e vegetal se manteve estável, sem degradação ou quebra da mistura a curto prazo.

Os dados de viscosidade cinemática a 40 °C, ilustrados na Figura 2, mostram que o óleo de soja na sua forma pura registou a menor viscosidade, com o valor experimental de 31,34 cSt. Conforme o lubrificante hidráulico é adicionado à mistura, ocorre uma elevação gradual e contínua da propriedade, passando por faixas intermediárias até atingir o limite máximo de 52,50 cSt no óleo mineral puro.

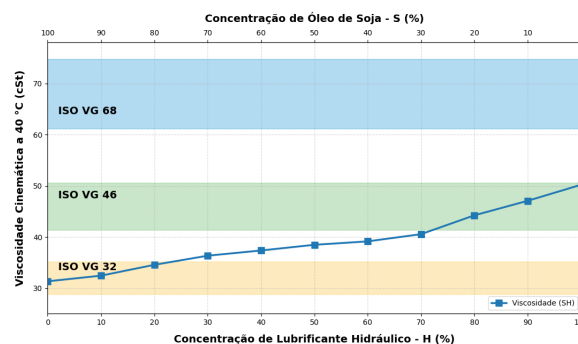


Figura 2. Comportamento de Viscosidade das misturas SH em Comparação Com a ISO 11158

Ao comparar os dados obtidos com as referências normativas para fluidos hidráulicos, constata-se que grande parte das misturas atendeu com sucesso aos limites de mercado. Especificamente, as amostras S100-H, S90-H e S80-H enquadraram-se na faixa ISO VG 32, e as formulações S20-H e S10-H na faixa ISO VG 46, muito embora as concentrações intermediárias tenham apresentado desvios.

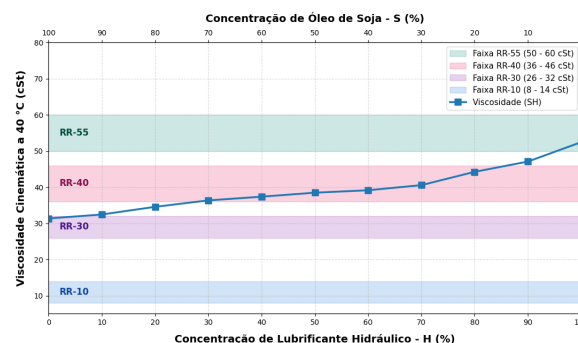


Figura 3. Comportamento de Viscosidade das misturas SH em Comparação Com os Valores Estabelecidos Pela ANP

Em relação à Resolução da ANP, é possível observar os resultados ilustrados na Figura 3, grande parte das amostras estão compreendidas entre as classificações RR-30, RR-40 e RR-55 (óleos básicos rerrefinados), cuja viscosidade varia de 26 a 60 cSt. Esses resultados reforçam o estudo de Hilal *et al.*, (2022), que investigam sistemas hidráulicos de circuito fechado empregando misturas de óleos vegetais e minerais. A presença do óleo vegetal foi responsável por diminuir significativamente a viscosidade da mistura, alcançando uma redução aproximada de 18% quando submetida a 40 °C. Os autores destacam que a diminuição da viscosidade melhora as propriedades de fluxo do sistema, reduzindo a queda de pressão (isto é, o fluido escoar com mais facilidade) e diminuindo o fator de atrito durante o escoamento, fenômeno atribuído em parte à menor sensibilidade à temperatura inerente às bases de ésteres naturais.

A análise do ponto de fulgor determina a temperatura mínima na qual um fluido libera vapores voláteis suficientes para inflamar na presença de uma fonte de ignição. Essa análise é muito importante, uma vez que estima a segurança operacional e a resistência térmica do lubrificante, constituindo um critério indispensável para antecipar a resposta do fluido sob regimes de atrito severo e estresse calórico em ambiente industrial (Khoirudin *et al.*, 2024).

Os resultados de ponto de fulgor, ilustrados na Figura 4, apresentam dados positivos para concentrações maiores de base vegetal, o que garante segurança térmica do lubrificante hidráulico na mistura.

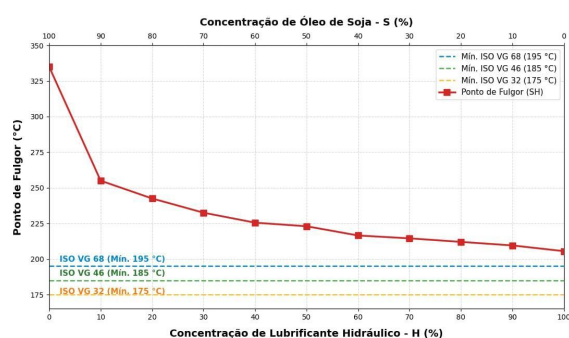


Figura 4. Comportamento de Ponto de Fulgor das misturas SH em Comparação Com a ISO 11158

O óleo de soja in natura (S100-H) apresentou um ponto de fulgor elevado de 335 °C, fazendo com que todas as misturas fiquem acima do limite mínimo de ponto de fulgor estabelecido pela norma regulatória para fluidos hidráulicos ISO 11158. Além disso, conforme ilustrado na Figura 5, é possível observar os resultados em comparação com os valores normalizados pela ANP.

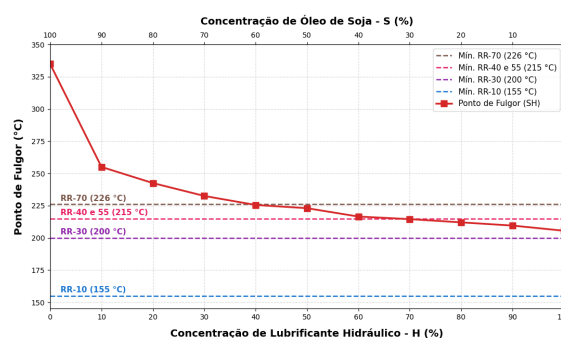


Figura 5. Comportamento de Ponto de Fulgor das misturas SH em Comparação Com os Valores Estabelecidos Pela ANP

Nota-se que as misturas de S100-H a S70-H atendem às especificações da classe RR-70, enquanto as formulações de S60-H a S30-H enquadram-se nos limites das faixas RR-55 e RR-40. As demais amostras mostram-se em conformidade com as classes RR-30 e RR-10, segundo a Resolução ANP N° 911/2022.

Essa alta tolerância à ignição da base vegetal está de acordo com os resultados de Karthik *et al.*, (2024). Segundo os autores, enquanto a amostra base de óleo mineral apresenta um ponto de fulgor de apenas 179°C, as formulações contendo óleos vegetais atingem valores superiores, chegando a picos de até 341°C. Assim como evidenciado nos resultados dos autores, a amostra in natura (S100-H) de óleo vegetal apresenta valores elevados de ponto de fulgor (335°C), consequência da predominância de ésteres naturais que eleva de forma expressiva a resistência à inflamabilidade da mistura (Karthik *et al.*, 2024). Isso garante que as formulações fiquem confortavelmente acima dos limites normativos, reduzindo drasticamente os riscos de ignição sob condições operacionais extremas.

Por outro lado, a queda abrupta inicial na temperatura de fulgor, observada logo nas primeiras reduções da porcentagem de base vegetal, é justificada pela estrutura molecular do óleo de soja, que é constituído predominantemente por triglicerídeos de cadeias carbônicas longas e insaturadas. Quando essas estruturas interagem com os hidrocarbonetos do óleo mineral que, isoladamente, volatilizam a temperaturas muito mais baixas (179°C), ocorre a quebra da simetria das forças intermoleculares de coesão, alterando o equilíbrio da pressão de vapor do sistema Karthik *et al.*, (2024). Consequentemente, as frações mais voláteis evaporam e atingem o ponto de fulgor mais rapidamente nas misturas com menor concentração de óleo mineral, gerando a queda abrupta observada.

A massa específica é uma propriedade física fundamental definida pela razão entre a massa de um fluido e o volume por ele ocupado a uma temperatura

controlada. Esse parâmetro é fundamental para o dimensionamento hidrodinâmico, visto que ele dita a inércia do fluido, influenciando diretamente o cálculo da perda de carga e a eficiência volumétrica das bombas em circuitos hidráulicos de alta pressão (Yetilmezsoy, 2020)

Os resultados da análise de massa específica para as amostras SH estão ilustradas na Figura 6. O óleo de soja na sua forma pura apresenta o maior valor de massa específica, situando-se no topo da curva gráfica, chegando a 918,54 kg/m³. À medida que o lubrificante hidráulico mineral é adicionado à formulação, observa-se uma redução progressiva desses valores. Esse perfil decrescente confirma que a incorporação do óleo mineral diminui a massa específica da mistura.

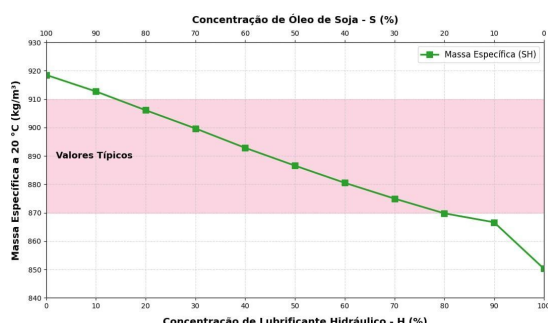


Figura 6. Comportamento da Massa Específica das misturas SH

Por sua vez, embora a norma ISO e a resolução da ANP citadas não estabeleçam limites normativos fixos para a massa específica, a comparação desta propriedade com os valores típicos de referência comercial de 870,0 a 910,0 kg/m³ (Sajeeb, Rajendrakumar, 2019) demonstra que as misturas de S80-H a S20-H permanecem dentro do intervalo esperado. Em contrapartida, nas formulações de S100-H a S80-H (teor vegetal maior ou igual a 80%) e de S10-H a S00-H (teor vegetal menor ou igual a 10%), o sistema híbrido ficou fora dos valores de referência, o que reflete a maior densidade do componente vegetal.

Esse perfil decrescente corrobora os dados de Uppar, Dinesha e Kumar (2022), que apontam que os óleos vegetais de base triglicéridica possuem, tipicamente, massas específicas próximas a 940 kg/m³, enquanto os óleos minerais convencionais possuem a massa específica média situada em torno de 880 kg/m³. A justificativa física e química para a elevada massa específica das amostras ricas em óleo de soja está diretamente associada à organização da sua molécula. Conforme discutido por Uppar, Dinesha e Kumar (2022), os óleos vegetais são constituídos majoritariamente por triglicerídeos (de 91% a 96%), que consistem em três cadeias longas de ácidos graxos ligadas por meio de ligações covalentes a uma

molécula de glicerol. Desse modo, embora a presença de ácidos graxos de cadeia longa no óleo vegetal aumente a massa específica do sistema, o acréscimo progressivo de óleo mineral atua diminuindo essa propriedade, sendo essencial para enquadrar as misturas dentro da faixa de valores típicos.

O ensaio de cor é um parâmetro visual utilizado para avaliar a integridade de lubrificantes. Embora a coloração original de fábrica não seja necessariamente um atestado de qualidade do produto, alterações na cor do fluido são indicativos importantes de reações químicas e degradação estrutural. A avaliação desse parâmetro permite identificar a presença de contaminantes decorrentes de processos como oxidação, falhas térmicas, atrito excessivo no motor ou a mistura indevida com outros tipos de fluidos (Yunardi *et al.*, 2020).

Os resultados apresentados na Figura 7 mostram que a análise visual da coloração do fluido híbrido depende diretamente das características originais de cada óleo.

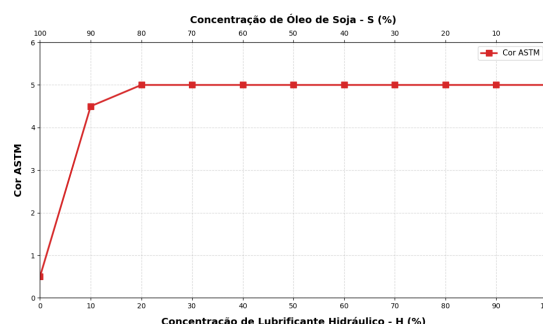


Figura 7. Comportamento da Massa Específica das misturas SH

A base de soja in natura apresenta a tonalidade mais clara, registrando 0,5. Conforme o composto mineral entra na mistura, ocorre um aumento nos resultados para faixas de < 4,5 e < 5, até se estabilizar em 5 nas frações seguintes. Essa mudança abrupta é decorrente da coloração clara e translúcida do óleo de soja refinado in natura, uma vez que o óleo bruto possui originalmente uma tonalidade avermelhada e fosca com baixa transparência, mas que, ao passar pelos processos industriais de degomagem, clarificação e remoção de impurezas, apresenta uma drástica redução na quantidade, diversidade e concentração de seus compostos e pigmentos residuais (Sun *et al.*, 2025), aliado à ausência de aditivos escurecedores. Por outro lado, a presença de aditivos específicos no óleo hidráulico mineral faz com que, mesmo em pequenas proporções, o componente mineral domine a cromaticidade da mistura, elevando rapidamente o valor na escala ASTM. O resultado demonstra que mesmo misturas contendo até 80% de óleo de soja mantêm o padrão visual característico do óleo hidráulico puro (fixado no valor 5,0). Esse



comportamento é altamente favorável, pois indica que a incorporação da base vegetal não altera a percepção visual do fluido, permitindo que a inspeção prática no sistema hidráulico continue sendo um método eficaz para detectar a presença de contaminantes ou a degradação por oxidação.

Esses resultados alinham-se com os trabalhos de Sanga *et al.*, (2019) e Santana (2007), que afirmam que a coloração final no ensaio ASTM depende fortemente da composição química e da proporção da mistura entre fluidos de naturezas distintas.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica do desenvolvimento de uma formulação lubrificante híbrida (mineral-vegetal) a partir do óleo de soja, consolidando uma alternativa promissora para a mitigação de impactos ambientais e redução da dependência de insumos puramente fósseis em sistemas hidráulicos industriais. A caracterização físico-química e o monitoramento termo-temporal evidenciaram que a hibridização interfere diretamente nas propriedades das misturas.

No intervalo de concentrações de S10-H a S40-H, as formulações atenderam rigorosamente aos critérios estabelecidos pela Resolução ANP Nº 911/2022 para massa específica. Em relação às medidas reológicas, verificou-se que parcelas específicas do sistema SH obtiveram enquadramento direto nas classes de viscosidade comercial da ISO, com destaque para a amostra S10-H e S20-H (ISO VG 46). Esse comportamento demonstra o potencial de aplicação direta dessas faixas no mercado de lubrificantes, limitando a zona de transição reológica a concentrações específicas e confirmando a viabilidade física de misturas com até 20% de teor vegetal.

Sob a perspectiva da segurança operacional, a biomassa desempenhou um papel crucial ao elevar de forma expressiva o ponto de fulgor das misturas, reduzindo significativamente os riscos de inflamação e explosão em circuitos sob alta pressão. Adicionalmente, as propriedades ópticas foram beneficiadas pela ação clareadora do óleo de soja, diminuindo a opacidade escura característica do fluido fóssil puro.

Em suma, as formulações híbridas contendo óleo de soja validam a estratégia de aliar o desempenho técnico de bases minerais ao apelo ecológico de matérias-primas renováveis abundantes no estado do Maranhão. O estudo consolida dados fundamentais para o desenvolvimento de biolubrificantes, indicando que o ajuste preciso das proporções de hibridização permite a obtenção de fluidos que

equilibram a conformidade regulatória e as metas de sustentabilidade ambiental.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) pela bolsa de iniciação científica (BIC-15416/25). A Universidade Federal do Maranhão (UFMA), ao Laboratório de Pesquisas Químicas Analítica (LPQA) e ao Laboratório de Análises e Pesquisa em Química Analítica de Petróleo e Biocombustíveis (LPQAP) da UFMA, pela infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, K. M. Obtenção de misturas de óleos vegetais: otimização, caracterização e predição de propriedades físicas e químicas. 2012. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Engine Oil Licensing and Certification System. API 1509. 21. ed. Washington, D.C.: API, 2021. Disponível em: <https://www.api.org>. Acesso em: 15 jul. 2026.
- AMORIM, P. E. C. *et al.* Soybean production in the state of Maranhão and its relationship with the gross domestic product. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 38, n. 3, p. 1-11, jul./set. 2023. Disponível em: <http://energiajnaagricultura.fca.unesp.br>. Acesso em: 17 maio 2026.
- BELMIRO, Pedro Nelson. Mercado Brasileiro de lubrificantes bate recorde histórico crescendo 2,3% em 2024. Portal Lubes, Rio de Janeiro, 4 fev. 2025. Disponível em: <https://portallubes.com.br/2025/02/mercado-brasil-eiro-de-lubrificantes-bate-recorde/>. Acesso em: 5 maio 2026.
- BOICHENKO, Sergii *et al.* Analysis of technological potential for utilization of waste aviation lubricating materials. *Technology Audit and Production Reserves*, n. 2/1 (58), p. 26-32, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.229673>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 911, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações dos óleos básicos e suas regras de comercialização. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 220, p. 77, 23 nov. 2022.



- Disponível em: <https://www.in.gov.br/>. Acesso em: 14 jul. 2026.
- BUNGE ALIMENTOS S.A. Óleo de Soja Soya. Bunge Alimentos S.A., Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.soya.com.br/produtos/para-sua-casa/oleos/oleo-de-soja-soya>. Acesso em: 27 maio 2026.
- CHAMONGE, E. R. Óleos básicos vegetais biodegradáveis como potencial alternativa aos óleos básicos convencionais: comparação das propriedades físico-químicas e tribológicas e viabilidade econômica na formulação de biolubrificantes automotivos e industriais. 2024. 152 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.
- DANTAS, F. R. *et al.* Síntese e caracterização físico-química de biolubrificante obtido de óleo de soja residual oriundo de restaurante universitário. Educação, Ciência e Saúde, Cuité, v. 8, n. 2, p. 1-19, jul./dez. 2021.
- GARCÉS, Rafael; Martínez-Force, Enrique; Salas, Joaquín J. Vegetable oil basestocks for lubricants. Grasas y Aceites, Sevilha, v. 62, n. 1, p. 21-28, jan./mar. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/gya.045210>. Acesso em: 5 maio 2026.
- GOKARN, Narendra A.; KIRAN, K. N. Role of Lubricants in Industry: A Review. Journal of ISAS, v. 2, n. 1, p. 69-83, jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.59143/isas.jisas.2.1.WFJR9779>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- HILAL, Areej H. *et al.* Experimental, statistical, and numerical investigations for influence of using vegetable oil with mineral oil to enhance the flow characteristics through a closed hydraulic circuit. Results in Engineering, v. 15, p. 100608, 2022.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11158: Lubricants, industrial oils and related products (class L) — Family H (hydraulic systems) — Specifications for categories HH, HL, HM, HV and HG. Geneva: ISO, 2009. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/40038/46671/df64de64679a5a9ec0ac672f05a/ISO-11158-2009.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2026.
- KARTHIK, M. *et al.* Appropriate analysis on properties of various compositions on fluids with and without additives for liquid insulation in power system transformer applications. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 17814, 2024.
- KHOIRUDIN *et al.* Flash point improvement of mineral oil utilizing nanoparticles to reduce fire risk in power transformers: a review. Fire, v. 7, n. 9, p. 305, 2024.
- LIMA, F. S.; Rodrigues, W.; Oliveira, N. M. de. Competitividade do biodiesel: desafios e perspectivas na região MATOPIBA. Informe GEPEC, Toledo, v. 28, n. 1, p. 208-230, jan./jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/gepec.v28i1.31952>. Acesso em: 17 maio 2026.
- MEKONNEN, B. A.; ARAGAW, T. A.; GENET, M. B. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. Frontiers in Environmental Science, v. 12, art. 1354422, p. 1-25, 22 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- MORAIS, H. L. O. Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação. 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- MURRU, Clarissa; Badía-Laíño, Rosana; Díaz-García, Marta E. Oxidative Stability of Vegetal Oil-Based Lubricants. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 1459-1476, jan. 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/journal/asccec>. Acesso em: 5 maio 2026.
- NIETO G., N. A. Análise experimental e exergética da operação de um motor diesel com óleo vegetal. 2012. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- OLAGUNJU, Aderonke Ibidunni; ADELAKE, Omowumi Sarah; OLAWOYIN, Modupe Safurah. The effect of rice bran extract on the quality indices, physicochemical properties and oxidative stability of soybean oil blended with various oils. Measurement: Food, v. 6, p. 100032, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772275922000119>. Acesso em: 15 julho 2026.
- PEREIRA, S. P. da S.; Vieira, A. S. da C. Analysis of the efficiency in the productivity of oilseeds exploited for biodiesel in Brazil. Latin American Journal of Business Management, Taubaté, v. 16, n. 1, p. 4-22, jan./jun. 2025. Disponível em:



- <https://www.lajbm.com.br>. Acesso em: 17 maio 2026.
- PICHLER, Jessica *et al.* A comprehensive review of sustainable approaches for synthetic lubricant components. *Green Chemistry Letters and Reviews*, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1-28, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2185547>. Acesso em: 5 maio 2026.
- PITTA, C. S. R. *et al.* Desempenho da soja sob diferentes tráfegos agrícolas e plantas de cobertura de outono-inverno. *Revista Sodebras*, v. 16, n. 189, set. 2021.
- RISSMAN, J. *et al.* Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, v. 266, art. 114848, p. 1-26, 1 maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/5dq3f2w7>. Acesso em: 5 maio 2026.
- SAJEEB, Ayamannil; RAJENDRAKUMAR, Perikinalil Krishnan. Comparative evaluation of lubricant properties of biodegradable blend of coconut and mustard oil. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118255, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118255>. Acesso em: 20 julho 2026.
- SANGA, Ramesh *et al.* Design and development of opto-resistive type quasi-digital sensor and instrument for online assessment of the quality of lubricant oil. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 17, p. 7499-7506, 2019.
- SANTANA, Douglas Willian Emanuel Alves; SEPULVEDA, Marcelle Prates; BARBEIRA, Paulo Jorge Sanches. Spectrophotometric determination of the ASTM color of diesel oil. *Fuel*, v. 86, n. 5-6, p. 911-914, 2007.
- SANTOS, Bruno L. M. dos *et al.* Bioenergy in Brazil: the current scenario of the energy matrix and the biofuel production. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 5, p. 446-455, maio 2021. Disponível em: <https://www.sustenere.co>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- SANTOS, J. B.; LIMA, R. O. C. Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045. R4 – *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, Mossoró, v. 2, n. 1, p. 1-13, jun. 2022.
- SILVA, C. R. Propriedades físico-químicas e dielétricas de óleos vegetais para uso como isolante em transformadores. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- SOLEA, L. C.; GEORGESCU, C.; DELEANU, L. Viscosity dependence on shear rate and temperature for olive and soybean oils. *Journal of Engineering Sciences and Innovation, Romênia*, v. 1, n. 1, p. 110-119, 2016. Disponível em: <http://www.jesi.astr.ro>. Acesso em: 16 jul. 2026.
- SUN, Zhaohui *et al.* Refining reduced the number and content of compounds of soybean oil. *eFood*, v. 6, e70039, p. 1-10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/efd2.70039>.
- UPPAR, Rajendra; DINESHA, P.; KUMAR, Shiva. A critical review on vegetable oil-based bio-lubricants: preparation, characterization, and challenges. *Environment, Development and Sustainability*, v. 25, n. 9, p. 9011-9046, 2023.
- VALVOLINE GLOBAL OPERATIONS. Types of Hydraulic Oil: How to Choose the Right One. Valvoline Global Europe, [s.d.]. Disponível em: valvolineglobal.com. Acesso em: 22 jul. 2026.
- WOMA, T. Y. *et al.* Vegetable Oil Based Lubricants: Challenges and Prospects. *Tribology Online*, Tóquio, v. 14, n. 2, p. 60-70, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2474/trol.14.60>. Acesso em: 5 maio 2026.
- YETILMEZSOY, Kaan. Introduction of explicit equations for the estimation of surface tension, specific weight, and kinematic viscosity of water as a function of temperature. *Fluid Mechanics Research International Journal*, v. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15406/fmri.2020.04.00057>. Acesso em: 20 julho 2026.
- YUNARDI, R. T. *et al.* Side-polished fiber sensor for measurement of the color concentration in lubricant products. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. p. 012001.