



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATEUS MELO MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ÓLEOS LUBRIFICANTES
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE REFRIGERAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS

2022

MATEUS MELO MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ÓLEOS LUBRIFICANTES
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE REFRIGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Materiais, pelo curso de
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Diego Berti Salvaro

FLORIANÓPOLIS

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATEUS MELO MARTINS

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ÓLEOS LUBRIFICANTES
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE REFRIGERAÇÃO**

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Celso Peres Fernandes
Coordenador do Curso

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Diego Berti Salvaro

MSc. Sílvia Betta Canever

Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto

À minha família e amigos,
por todo apoio, amor
e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Engenharia de Materiais pelos aprendizados proporcionados, os quais são fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Laboratório de Materiais – LabMat – e a todos os seus professores, pela oportunidade de realizar este trabalho em um laboratório referência na área de Ciência e Engenharia de Materiais e investir na formação acadêmica e profissional dos seus alunos.

Ao meu orientador, Dr. Diego Berti Salvaro, pela confiança depositada, conhecimentos compartilhados e pela disponibilidade para sanar todas as dúvidas que surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Nidec e à FEESC pelo apoio financeiro.

À minha mãe, Eliete Iolanda Pereira, ao meu pai, Andrey Antônio Martins, à minha namorada, Maria Antônia Macedo e aos amigos pelo suporte e apoio nas minhas decisões e atividades que executo.

À todos que de alguma forma tenham me auxiliado, o meu muito obrigado.

“A persistência é o menor caminho
do êxito”. (Charles Chaplin)

RESUMO

Com o advento de novas tecnologias e com a crescente preocupação com o meio ambiente, intensificou-se a quantidade de pesquisas realizadas com o intuito de desenvolver novos lubrificantes que aliam uma maior eficiência e um menor impacto para a natureza, principalmente com a inserção de partículas nanolubrificantes e outros aditivos em óleos já comercializados. Entretanto, para que se possa realizar um estudo fundamentado acerca da alteração de novos óleos lubrificantes, é necessário possuir conhecimento reológico do óleo a ser alterado. Com isso, este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento reológico de óleos lubrificantes a temperaturas de 25, 50 e 75°C comumente utilizados em sistemas de refrigeração sob altas taxas de cisalhamento. Para tanto, utilizou-se um reômetro de placas paralelas para o desenvolvimento da caracterização reológica, onde foi realizada, inicialmente, a avaliação da água para observar que a melhor condição a ser utilizada para a análise dos óleos lubrificantes era empregar uma distância entre placas de 200 μm e um volume amostral dos óleos de 580 μL . Além disso, os ensaios realizados para os óleos tiveram a seguinte dinâmica: empregou-se taxas de cisalhamento até 20.000 s^{-1} (ida) e, ao alcançá-la, submeteu os óleos a taxas de cisalhamento decrescentes (volta), retornando para a taxa de cisalhamento de 0 s^{-1} . Os resultados obtidos foram analisados de forma comparativa e matemática com os modelos de fluidos newtonianos e não newtonianos. Os óleos Alquilbenzenos e Mineral, a depender do valor da taxa de cisalhamento e da temperatura os quais estavam submetidos, apresentaram leves inclinações diferentes, variando entre comportamento newtoniano, dilatante e pseudoplástico. Os óleos Poliolesteres, por sua vez, a partir da taxa de cisalhamento de 15.000 s^{-1} , apresentaram queda da taxa de cisalhamento, fato esse que não foi observado para os outros óleos. Com isso, analisou-se a possibilidade dos óleos Poliolesteres possuírem dependência com o tempo. Para isso, o óleo Poliolesteres ISO 10 foi submetido à taxa de cisalhamento de 20.000 s^{-1} , permaneceu 60 minutos em repouso e foi submetido novamente a mesma taxa de cisalhamento, sendo que um novo ensaio foi realizado com a mesma amostra, porém com um intervalo de tempo de 30 minutos. Assim, ficou evidenciado que a viscosidade, para os óleos Poliolesteres estudados, possuem uma dependência direta com o tempo. A análise realizada por meio dos modelos matemáticos evidenciou que os óleos apresentaram comportamento praticamente newtoniano para praticamente todas as temperaturas, sendo que os Poliolesteres demonstraram comportamento newtoniano até taxas de cisalhamento próximas a 15.000 s^{-1} , onde houve uma queda brusca, caracterizando-se, a partir dessa taxa, como um óleo pseudoplástico.

Palavras chave: Reologia; óleo lubrificante; lubrificação.

ABSTRACT

With the advent of new technologies and the growing concern for the environment, the amount of research carried out with the aim of developing new lubricants that combine greater efficiency and less impact on nature has intensified, especially with the insertion of particles. nanolubricants and other additives in already marketed oils. However, in order to carry out a reasoned study about the alteration of new lubricating oils, it is necessary to have rheological knowledge of the oil to be altered. Thus, this work aims to study the rheological behavior of lubricating oils at temperatures of 25, 50 and 75°C commonly used in refrigeration systems under high shear rates. For this purpose, a parallel plate rheometer was used for the development of the rheological characterization, where, initially, the evaluation of the water was carried out to observe that the best condition to be used for the analysis of lubricating oils was to use a distance between plates of 200 μm and a sample volume of the oils of 580 μL . In addition, the tests carried out for the oils had the following dynamics: shear rates up to 20.000 s^{-1} (outward) were used and, upon reaching it, the oils were subjected to decreasing shear rates (back), returning to the shear rate of 0 s^{-1} . The results obtained were analyzed in a comparative and mathematical way with the models of Newtonian and non-Newtonian fluids. The Alkylbenzene and Mineral oils, depending on the value of the shear rate and the temperature to which they were subjected, presented slightly different inclinations, varying between Newtonian, dilatant and pseudoplastic behavior. Polyolester oils, in turn, from the shear rate of 15.000 s^{-1} , showed a drop in the shear rate, a fact that was not observed for the other oils. With this, it was analyzed the possibility of Polyolester oils having dependence with time. For this, the Polyolesters ISO 10 oil was subjected to a shear rate of 20.000 s^{-1} , remained at rest for 60 minutes and was subjected again to the same shear rate, and a new test was performed with the same sample, but with a time interval of 30 minutes. Thus, it was evidenced that the viscosity, for the Polyolester oils studied, have a direct dependence with time. The analysis carried out using the mathematical models showed that the oils showed practically Newtonian behavior for practically all temperatures, and the Polyolesters showed Newtonian behavior up to shear rates close to 15,000 s^{-1} , where there was a sudden drop, characterizing, from that rate, as a pseudoplastic oil.

Keywords: Rheology; lubricant; lubrication.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVOS PRIMÁRIOS	13
2.2. OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. TRIBOLOGIA	14
3.2. LUBRIFICANTES	14
3.2.1. Óleo Lubrificante	16
3.3.2. Óleos em sistemas de refrigeração	16
3.3. REOLOGIA	19
3.3.1. Viscosidade	20
3.3.2. Medidas reológicas	24
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
4.1. OLÉOS LUBRIFICANTES	28
4.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	29
4.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE FLUXO	30
4.3.1. Determinação da distância entre as placas	31
5. RESULTADOS	33
5.1. DENSIDADE DOS ÓLEOS	33
5.2. DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE PLACAS NOS ENSAIOS REOLÓGICOS	35
5.3. TESTES DE REOLÓGICOS COM OS ÓLEOS	37
5.4. ESTUDO DA REDUÇÃO DA VISCOSIDADE	43
5.5. MODELOS MATEMÁTICOS	46
6. CONCLUSÃO	50
7. REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, há a evolução da sociedade e, atribuído a isso, ocorre a busca pelo desenvolvimento de novos materiais de alta performance ou a melhoria dos já existentes. O esforço empregado para produzir novos materiais deve-se à uma melhora no conjunto de propriedades dos materiais, como a redução do coeficiente de atrito, ao aumento da resistência ao desgaste, a elevada resistência mecânica, etc. Portanto, esses materiais e os processos para obtê-los devem apresentar competitividade no mercado, que por sua vez é repleto de regulamentações.

Atualmente, tem-se dedicado à produção de sistemas mecânicos mais eficientes em termos energéticos. Para se ter uma ideia, segundo Taylor (1998), cerca de 18 a 40% da energia é desperdiçada devido ao atrito e ao desgaste. Além disso, pondera-se que 1,0 a 1,4% do produto interno bruto de países industrializados poderia ser economizado aplicando-se boas práticas já desenvolvidas para redução de atrito. Devido a essas problemáticas causadas pelo atrito e desgaste oriundo do contato de superfícies em movimento relativo, há o desenvolvimento de diversos estudos em lubrificação seja por meio da aplicação de lubrificantes sólidos, líquidos ou gasosos. (HOLMBERG; ERDEMIR, 2019)

Os lubrificantes líquidos podem ser divididos em óleo mineral e óleo sintéticos, os quais, quando comparados com os outros tipos de lubrificantes (sólidos e gasosos), destacam-se pela sua alta comercialização, pois existe uma grande variedade no mercado e, também, devido às suas propriedades intrínsecas, como a elevada resistência à temperatura e resistência à oxidação, entre outras. Além disso, os lubrificantes líquidos se destacam devido à possibilidade da sua aditivação (inserção de compostos orgânicos ou inorgânicos em lubrificantes líquidos, sólidos e gasosos), viabilizando a utilização de lubrificantes líquidos para os mais variados sistemas mecânicos.

Nos compressores utilizados na indústria de refrigeração, emprega-se óleos lubrificantes, os quais desempenham uma série de funções fundamentais para o funcionamento adequado do sistema. A principal delas é a redução da taxa de desgaste nos componentes mecânicos do compressor, como por

exemplo, eixo, pistão e biela. Nesse processo, os óleos lubrificantes podem estar submetidos a temperaturas próximas à 140 °C e taxas de cisalhamento superiores à 100.000 s⁻¹. Deste modo, é importante que o comportamento reológico dos óleos sob tais condições seja conhecido para poder projetar um sistema mecânico eficiente.

Ao analisar o comportamento reológico de óleo lubrificante, a rigor, trata-se de entender o comportamento da viscosidade do fluido submetido a diferentes condições de temperatura de cisalhamento, o que ainda é um desafio nos estudos que são realizados para a área de compressores utilizados na indústria de refrigeração. A viscosidade, segundo Carreteiro (2006), é uma das principais propriedades de um óleo lubrificante, pois essa está diretamente ligada a capacidade de carga do mancal e ao fluxo de calor no sistema, que por sua vez deve ser mantido dentro de limites estabelecidos em projeto.

Há algumas formas de realizar o estudo reológico de óleos lubrificantes, porém, os critérios de teste devem levar em consideração o funcionamento do sistema o qual o óleo é aplicado. Uma das formas mais comuns de realizar essa análise é por meio do reômetro de placas paralelas, onde o óleo lubrificante fica alocado entre duas placas, sendo uma estacionária e outra que pode girar controladamente, a qual ocasiona o cisalhamento do fluido. A distância entre as placas também é controlada de maneira a que possam ser atingidas altas taxas de cisalhamento.

Neste trabalho foi realizado o estudo do comportamento reológico em óleos típicos da indústria de refrigeração, sendo eles óleos alquilbenzenos, minerais e poliolesteres com diferentes viscosidades, nos quais foram submetidos a ensaios reológicos em reômetro de placas paralelas à temperatura de 25, 50 e 75°C. Os resultados mostram que a maioria dos óleos apresentam um efeito levemente dilatante, enquanto que óleos ésteres um comportamento pseudoplásticos é observado a partir de aproximadamente 15.000 s⁻¹.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS PRIMÁRIOS

Identificar os comportamentos reológicos dos óleos Alquilbenzenos ISO 02, 05 e 22, Mineral ISO 10 e Poliesteres ISO 10 e 22 a partir de um reômetro de placas paralelas

2.2. OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Estabelecer os parâmetros a serem adotados para a avaliação reológica dos óleos, como a distância entre placas paralelas e o volume amostral.
- Avaliar visualmente e por meio de modelos matemáticos o comportamento reológico obtido para cada óleo nas temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C.
- Analisar as diferenças existentes nos comportamentos reológicos entre as diferentes classes de óleos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TRIBOLOGIA

Tribologia é a ciência que estuda os fenômenos associados às superfícies em contato em movimento relativos e práticas correlatas (Jost, 1966). Basicamente, compreende estudos relacionados sobre atrito, desgaste e lubrificação. Segundo os autores Holmberg, Andersson e Erdemir (2012), cerca de 20% da energia global é utilizada para superar o atrito em partes móveis de componentes mecânicos.

Com o intuito de obter menores coeficientes de atrito e, conseqüentemente, proteção contra o desgaste, utiliza-se a lubrificação fluida. Para tanto, faz-se a adição de um fluido entre as superfícies sujeitas as condições tribológicas para reduzir a resistência ao cisalhamento do par tribológico.

Em um mancal hidrodinâmico bem projetado, por exemplo, o processo de cisalhamento do fluido lubrificante gera um campo de pressão capaz de separar completamente as superfícies do mancal, mesmo sob elevadas cargas de trabalho. Isso leva a valores de coeficiente de atrito muito reduzidos (0,004) e desgastes nulos. (LIRA NUNES, 2020) A equação de Reynolds que rege o comportamento dos mancais hidrodinâmicos leva em consideração a viscosidade do lubrificante que, por sua vez, pode ser função da taxa de cisalhamento do fluido. Sendo assim, a caracterização desse comportamento, viscosidade versus taxa de cisalhamento é fundamental para um desenvolvimento de mancais mais eficientes. (GALVÃO, 2016)

3.2. LUBRIFICANTES

Uma substância interposta entre superfícies em processo tribológico capaz de reduzir a fricção e o desgaste pode ser considerado um lubrificante, logo a aplicação desse lubrificante consiste no processo chamado de lubrificação. Ela pode ser feita de diversas formas, contudo, alguns fatores importantes devem ser levados em conta, como geometria e topografia das superfícies deslizantes, a carga aplicada, pressão, temperatura, velocidades de rolamento e escorregamento, condições ambientais, propriedades físicas e químicas do lubrificante e das superfícies.

Dentro do universo de lubrificantes existem basicamente três tipos, são eles:

- Lubrificantes sólidos: são utilizados como pó ou filme fino que reduz o atrito e o desgaste das superfícies de contato em movimento relativo e fornece proteção contra danos. O principal objetivo dos lubrificantes sólidos é formar uma película aderente contínua, macia ou dura, nas superfícies de atrito. Esses filmes podem ser aplicados por processos mecânicos, (eletro)químicos ou físicos. Diferencia-se dos modelos de fricção para lubrificantes líquidos em função dos efeitos da forma das partículas, tamanho, mobilidade e características cristalográficas das partículas (BART, 2013).
- Lubrificantes fluidos: estes são os mais utilizados em sistemas mecânicos. Eles podem ser classificados de acordo com sua origem em dois grupos: óleos minerais derivados do petróleo (a maioria) e óleos sintéticos. A maioria dos lubrificantes líquidos contém aditivos para melhorar suas propriedades naturais, ou conferir novas propriedades, para que tenham qualidades adequadas às suas aplicações e que sua operação possa ser prolongada. Lubrificantes líquidos são usados como tal ou como emulsões de água, onde o resfriamento eficiente é necessário, bem como a tarefa de lubrificação.
- Lubrificantes gasosos: utilizam-se quando os outros dois tipos de lubrificantes não podem ser empregados, como, por exemplo, em mancais os quais operam em regimes aerodinâmicos com rotações entre 10.000 a 600.000 rpm ou em sistemas com temperaturas superiores ao ponto de congelamento, fusão ou de degradação de lubrificantes sólidos e líquidos (VACLAV STEPINA, 1992).

Em se tratando de lubrificação fluida, além da lubrificação, os lubrificantes podem ainda desempenhar outras funções importantes em um sistema mecânico como proteção contra a corrosão, auxílio à vedação e gerenciamento térmico (CUNHA, 2005). Contudo, muitas vezes algumas propriedades dos lubrificantes precisam ser melhoradas para atingir requisitos específicos de projeto, esse processo é comumente realizado com o uso de aditivos. Esses aditivos são substâncias químicas incorporadas a formulação do lubrificante para

conferir características como a redução do atrito e do desgaste, a resistência à corrosão e retardo à ignição e à formação de espuma.

Neste trabalho serão analisados lubrificantes fluidos típicos da indústria de refrigeração.

3.2.1. Óleo Lubrificante

Óleo lubrificante, um fluido derivado do refino do petróleo, possui uma mistura de óleos virgens ou processados, minerais ou sintéticos e aditivos. São utilizados em equipamentos com partes móveis com a finalidade principal de reduzir o atrito e o desgaste, tornando o seu uso essencial na operação motores a combustão, compressores, bombas, sistemas de transmissão de torque e etc. Como já mencionado, os óleos lubrificantes desempenham outras funções dependendo da sua aplicação, como a função de transferência de calor, remoção de partículas de desgaste de partes móveis, transmissão de força mecânica, vedação e isolamento elétrico (SÁNCHEZ-ALVARRACÍN, 2021).

3.3.2. Óleos em sistemas de refrigeração

O principal objetivo do óleo em um sistema de refrigeração, além de outras finalidades importantes, é lubrificar o compressor. Entretanto, há um elemento contido em um sistema de refrigeração que pode influenciar diretamente na funcionalidade do óleo lubrificante: o fluido refrigerante. Este possui a função principal de realizar a transferência de calor.

Os óleos podem interagir com o fluido refrigerante na fase gasosa e na fase líquida do refrigerante. Tais interações são conhecidas como solubilidade e miscibilidade.

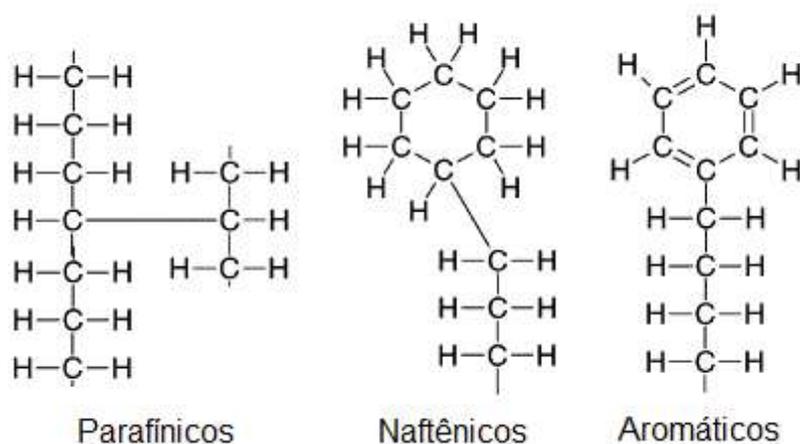
A solubilidade é a capacidade que o refrigerante possui de se dissolver no óleo, ocasionando a redução da viscosidade e, por vezes, a criação de uma mistura espumosa. O CO₂, por exemplo, possui elevada solubilidade em certos lubrificantes, resultando em uma diminuição drástica da viscosidade e na possibilidade da liberação de CO₂ em superfícies de mancais, rompendo os filmes lubrificantes. Há outros lubrificantes, como os hidrocarbonetos, que são mais solúveis em óleos minerais e menos em sintéticos.

A miscibilidade ocorre quando o refrigerante está na fase líquida e se mistura com o lubrificante. Há casos em que ocorre uma boa miscibilidade entre o refrigerante e o óleo, onde o óleo é transportado para todo o circuito e voltará com facilidade para o compressor. (MOBIL, 2019)

Há diversos tipos de óleos que podem ser empregados em compressores utilizados na indústria de refrigeração, a depender do tipo de compressor e outras variáveis, como a viscosidade. Entretanto, pode-se dividi-los basicamente em dois tipos, o óleo mineral e o sintético.

Os óleos minerais são obtidos do petróleo e como tal, são formados basicamente dos elementos químicos carbono e hidrogênio, sob a forma de hidrocarbonetos, e possuem moléculas com diferentes formas, dimensões e estruturas. Estes hidrocarbonetos constituintes do óleo mineral podem ser predominantemente parafínicos, naftênicos ou aromáticos, os quais possuem as moléculas representadas na Figura 1 (ALTEREVERO, 2016).

Figura 1 - Tipos de óleos minerais



Fonte: ALTEREVO, 2016

No entanto, a solubilidade limitada desses óleos minerais com alguns refrigerantes clorados, como R22 e R13, levou à investigação de novos lubrificantes sintéticos para uso em refrigeração (N.MARSH, 2002).

Os fluidos sintéticos são lubrificantes obtidos a partir de síntese química. Os principais fluidos sintéticos em uso atualmente são os ésteres de ácidos

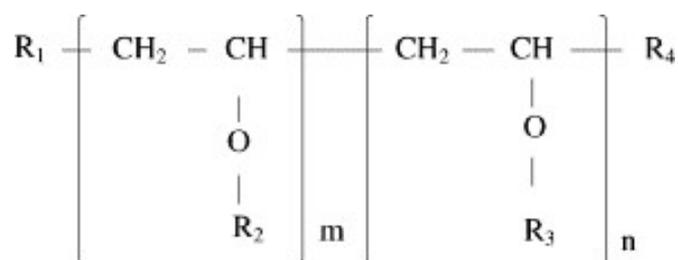
dibásicos, ésteres de organofosfatos, ésteres de silicatos, silicones e compostos de ésteres de poliglocóis.

Os óleos sintéticos são fabricados por meio de compostos químicos artificiais, os quais são feitos quebrando e reconstruindo as moléculas de petróleo. Esses, ao contrário dos óleos minerais, possuem todas as moléculas com a mesma dimensão e estrutura. Podem ser divididos em óleos totalmente sintéticos e com mistura sintética. O primeiro é projetado molécula por molécula sem usar petróleo e inclui aditivos com o intuito de evitar a degradação do óleo. Já o segundo é fabricado através da mistura entre o óleo mineral e óleos básicos sintéticos (N.MARSH, 2002).

Quando comparado com os óleos minerais, os óleos sintéticos possuem algumas vantagens, como a resistência à oxidação, degradação e melhor resistência a temperaturas extremas. Porém, há certas desvantagens, como o elevado custo e a maior possibilidade de decomposição em certos ambientes industriais. (TROUT, 2021). Como exemplo de óleos sintéticos, pode-se citar os lubrificantes Poliolester (POE) e os Alquilbenzenos (AB).

Os POE's (Figura 2) são amplamente utilizados na indústria de refrigeração, principalmente em sistemas de refrigeração domésticos e comerciais devido as vantagens ambientais, além de serem considerados biodegradáveis. Quanto a suas características químicas, é válido mencionar que os óleos ésteres são fluidos polares e, por esse motivo, tendem a dissolver muitas impurezas presentes em sistemas de refrigeração e a absorver certa quantidade de umidade, possibilitando que as suas propriedades sejam alteradas significativamente (N.MARSH, 2002).

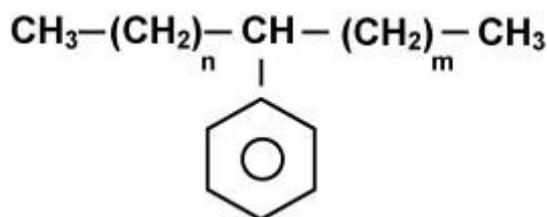
Figura 2 - Estrutura química do óleo Poliolester



Fonte: N.MARSH, 2002.

Os lubrificantes AB (Figura 3) possuem uma polaridade inferior aos POE'S, provocando uma menor absorção de umidade quando comparado aos ésteres. Esses óleos geralmente têm capacidade de vedação (fecha os espaços entre os componentes estacionários e móveis em compressores, impedindo a passagem de materiais indesejados) e propriedades de isolamento elétrico comparáveis às dos óleos minerais (N.MARSH, 2002).

Figura 3 - Estrutura química do óleo Alquilbenzeno



Fonte: MARCELINO NETO, 2021.

3.3. REOLOGIA

O termo “reologia” origina-se do grego “rhein” que significa “fluir”. Essa ciência estuda a deformação de um corpo sob a influência de tensões. Por meio de experimentos reológicos que produzem altas deformação advindas de forças de cisalhamento, é possível observar o comportamento do fluxo de líquidos e a deformação de sólidos. (SCHRAMM, 2004)

Na reologia, há termos que são fundamentais e devem ser explicados para um melhor entendimento dos resultados obtidos, são eles: taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento e viscosidade:

- Taxa de cisalhamento: é o gradiente de velocidade de um material (normalmente um fluido) ao ser submetido a um esforço cisalhante. Esta também pode ser denominada de grau de deformação ou gradiente de velocidade.
- Tensão de cisalhamento: é a força por unidade de área cisalhante, necessária para manter o escoamento do fluido. (BARRA, 2014)
- Viscosidade: é a resistência ao fluxo que o material oferece quando submetido a um esforço cisalhante.

Essas grandezas se relacionam através da Equação 1, onde σ representa a tensão de cisalhamento, $\frac{dv}{dy}$ a taxa de cisalhamento e a η viscosidade.

$$\sigma = \eta * \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

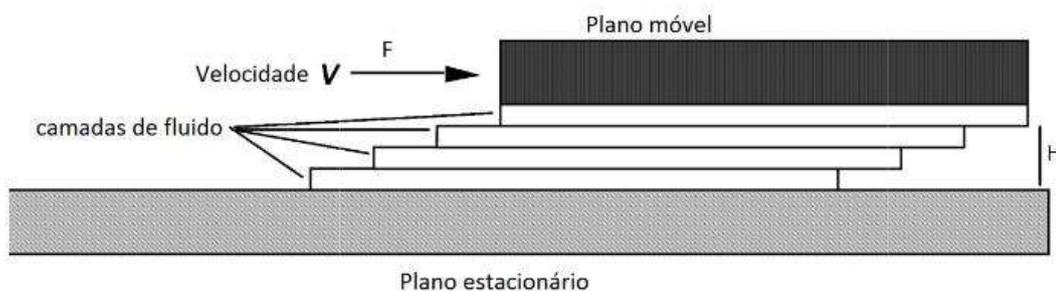
3.3.1. Viscosidade

A viscosidade de um fluido é a propriedade que determina o valor da sua resistência ao cisalhamento. A viscosidade é devida, principalmente, à interação existente entre as moléculas do fluido. (CARRETEIRO, 2006)

Essa propriedade pode ser afetada por certas variáveis, como taxa de cisalhamento, temperatura, pressão e tempo em que o fluido permanece em funcionamento no sistema. Para a maior parte dos fluidos, a viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura devido ao movimento browniano das moléculas constituintes, uma vez que quanto maior a sua temperatura, maior será a diminuição da sua viscosidade. (BARNES, 2000) Em contrapartida, segundo Blau (1996) e Hutchings (1992), a viscosidade possui uma relação exponencial com a pressão que é exercida pelo sistema sobre o fluido, ou seja, conforme é reduzida a pressão, a viscosidade diminui de forma exponencial.

A Figura 4 é um esquema didático para representar o comportamento de um fluido sob cisalhamento. Portanto são dois planos paralelos separados por uma distância H, onde o espaço existente entre os planos é composto por um fluido. Uma força F é exercida sobre o plano superior, o qual se move a uma velocidade V. A primeira camada molecular do fluido tem velocidade nula em relação ao respectivo plano, ou seja, as camadas moleculares adjacentes apresentam um gradiente de velocidade relativa entre elas, ao passo que as camadas moleculares localizadas próxima à interface da placa móvel possuem velocidade máxima. (RIZVI, 2009)

Figura 4 - Representação de dois planos paralelos separados



Fonte: RIZVI, 2009.

A força F é diretamente proporcional à área A da placa móvel e à velocidade V é inversamente proporcional à distância H . A força F é uma força externa aplicada no plano móvel. Com isso, a Equação 2 demonstra a relação entre A , V e H , onde η é a viscosidade absoluta.

$$F = \eta * \frac{A*V}{H} \text{ ou } \eta = \frac{F/A}{V/H} \quad (2)$$

3.3.1.1. Viscosidade Dinâmica e Cinemática

A viscosidade dinâmica (viscosidade absoluta) e a cinemática medem a resistência de um fluido ao fluxo. A viscosidade dinâmica é utilizada principalmente para comparar diferentes fluidos com base em sua resistência ao fluxo. Tal resistência ocorre por causa das Forças de Van de Waals entre as moléculas do fluido. Quanto maior atração entre as moléculas, maior o efeito da viscosidade no fluxo do fluido. As moléculas do fluido possuem uma densidade ρ , com isso, é possível relacionar a viscosidade cinemática com a dinâmica, conforme a Equação 3. A viscosidade cinemática, no Sistema Internacional (SI), é representada através da unidade m^2/s , porém, normalmente utiliza-se Stokes (St) ou Centistokes (cSt). Já a viscosidade dinâmica no SI é $Pa*s$. (BARRON, 2012)

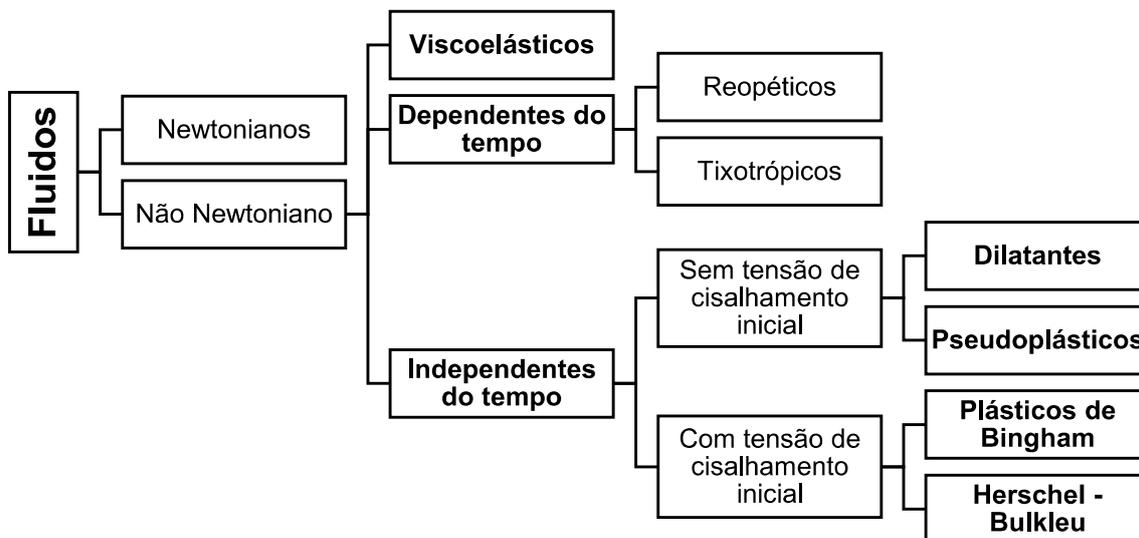
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Quanto à relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, os fluidos podem ser divididos em:

a. Fluidos Newtonianos: apresentam viscosidade constante, obedecendo a Lei de Newton da viscosidade, a qual define que taxa de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento (Equação 1). A água, os óleos vegetais e soluções de sacarose são exemplos comuns de fluidos Newtonianos.

b. Fluidos não Newtonianos: a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não é constante. Esses, como observa-se na Figura 5, podem ser classificados como viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo.

Figura 5 – Fluxograma das principais classificações dos fluidos



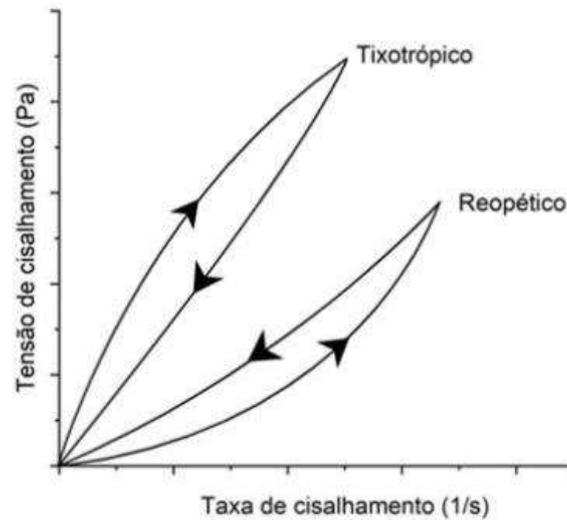
Fonte: BRAGA, 2007.

Os fluidos viscoelásticos possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas, uma vez que apresentam características viscosas com particularidades elásticas, proposta pelo modelo de Maxwell, e de sólidos com atributos viscosos, proposto pelo modelo de Kelvin-Voigt.

Os fluidos não newtonianos dependentes do tempo possuem propriedades que variam com a taxa de cisalhamento e com a tensão de cisalhamento. Pode-se dividi-los em tixotrópicos e reopéticos, os quais estão representados na Figura 6 por um gráfico tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento.

- Tixotrópicos: a sua viscosidade é inversamente proporcional ao tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, ou seja, a viscosidade diminui com o passar do tempo da ação da tensão de cisalhamento.
- Reopéticos: ao contrário dos tixotrópicos, para esses, a viscosidade é proporcional com o tempo de aplicação da tensão, voltando à viscosidade inicial quando a tensão de cisalhamento é interrompida.

Figura 6 - Representação do comportamento dos fluidos tixotrópicos e reopéticos



Fonte: MACHADO, 2022.

Os fluidos não newtonianos independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento podem ser divididos em aqueles que não necessitam e aqueles que necessitam de uma tensão inicial para poder iniciar o cisalhamento.

a. Sem tensão inicial: não precisam de tensão de cisalhamento para iniciar o escoamento. Fazem parte desse grupo a maior parte dos fluidos não newtonianos, evidenciando os seguintes:

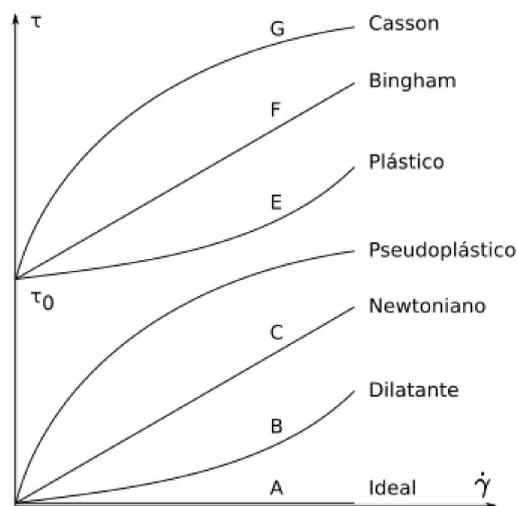
- Pseudoplásticos: quando em repouso, as moléculas ficam em um estado desordenado, porém, quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, elas tendem a se orientar na direção em que a força foi aplicada. Percebe-se que, quanto maior essa força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente
- Dilatantes: para esses, nota-se que existe um aumento da viscosidade aparente conforme a tensão de cisalhamento é intensificada. Quando à baixas tensões de cisalhamento, os fluidos dilatantes comportam-se como um fluido ideal, ou seja, como um fluido newtoniano, ao passo que para altas tensões, eles tendem a aumentar a viscosidade.

b. Com tensão inicial: precisam de uma tensão de cisalhamento para iniciar o escoamento. Ressalta-se esses:

- Plásticos de Bingham: os fluidos desse grupo, depois de atingir uma tensão de cisalhamento inicial, apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.
- Herschel-Bulkley: é também chamado de Bingham generalizado, uma vez que necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Porém, ao contrário do anterior, esse não possui uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Por meio da Figura 7, pode-se verificar o comportamento reológico do fluido newtoniano e dos fluidos não newtonianos independentes do tempo.

Figura 7 - Representação dos principais modelos reológicos

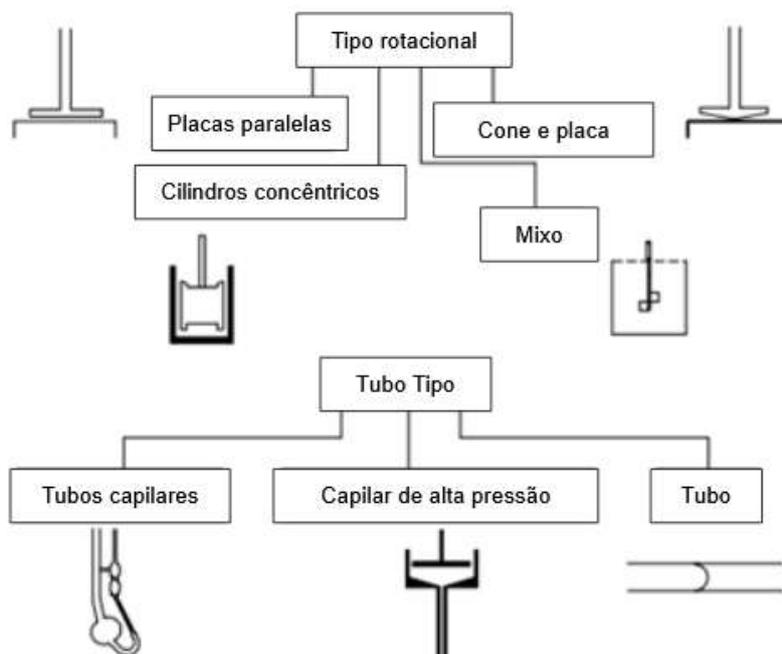


Fonte: MSPC, 2021.

3.3.2. Medidas reológicas

A determinação das propriedades reológicas de um fluido implica na determinação simultânea da tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento. Instrumentos comuns, capazes de medir essas propriedades podem ser divididos em duas categorias gerais, são elas: instrumentos do tipo rotacional ou do tipo tubo. A Figura 8 demonstra a subdivisão existente para cada grupo.

Figura 8 - Instrumentos reológicos comuns divididos em duas categorias principais:



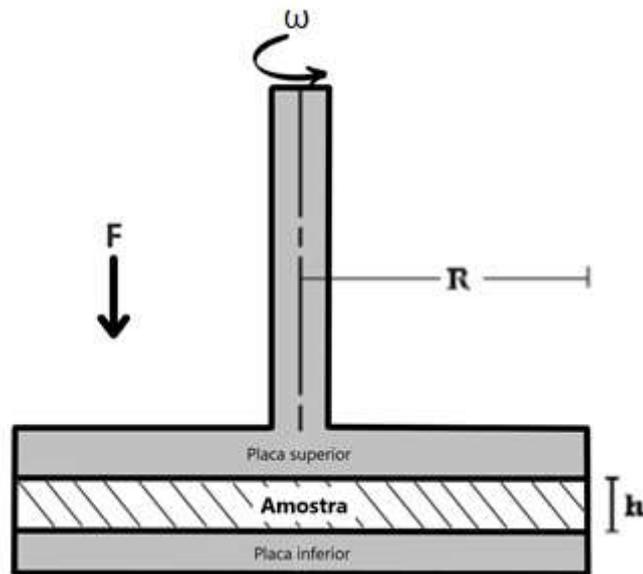
Fonte: STEFFE, 1996.

Os viscosímetros capilares possuem, basicamente, três tipos: os viscosímetros de Ostwald, Cannon-Fenske e Ubbelohde. Nestes viscosímetros, o fluido escoar em um tubo de seção circular, devido à diferença de pressão entre a entrada e a saída, a qual pode ser gerada pela gravidade ou outros meios mecânicos. Nestes modelos de viscosímetros, há taxa de cisalhamento atuante é praticamente nula e não possui a capacidade de interferir nos valores calculados para a viscosidade, ao contrário do que é visto para os reômetros rotacionais.

As medidas das propriedades reológicas num reômetro rotacional são feitas a partir de um fluxo de arraste, imposto pela rotação (em fluxo permanente) ou oscilação (em fluxo oscilatório) de uma geometria, a uma velocidade angular (ω).

A Figura 9 apresenta um esquema de um reômetro rotacional de placas paralelas, justamente a configuração utilizada nesta pesquisa. O reômetro é composto por duas placas iguais, uma das quais gira a uma velocidade angular dada, e a outra permanece sem movimento. As placas estão posicionadas a uma distância determinada entre elas onde é colocado o fluido material (amostra) em análise. (GOTRO, 2021)

Figura 9 - Esquema do reômetro rotacional de placas paralelas



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 9 representa uma pequena porção de fluido presente entre as placas paralelas. No reômetro rotacional de placas paralelas, o escoamento é causado pelo arraste de uma superfície em movimento (placa superior), enquanto que a placa inferior permanece estacionária. A velocidade angular (ω) medida define a taxa de cisalhamento, a qual é dependente do raio das placas, podendo ser calculada através da Equação 4. Ademais, deve-se ressaltar que, segundo SCHARAMM (2004), não é aconselhado operar o reômetro com uma distância entre as placas inferior a $300 \mu\text{m}$ e não superior a $300.000 \mu\text{m}$, uma vez que, caso contrário, resultados equivocados podem ser gerados.

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi * R * N}{30 * h} \quad (4)$$

Sendo que:

$\dot{\gamma}$ corresponde à taxa de cisalhamento;

R ao raio da placa circular;

h à distância entre as placas e

N à velocidade de rotação.

3.4. MODELOS MATEMÁTICOS

Na literatura há diversos modelos matemáticos que representam o comportamento dos fluídos. Entretanto, um dos modelos mais simples e mais utilizados nas soluções de engenharia é o modelo de Herschel-Bulkley (Equação 5). Este é utilizado principalmente para fluidos não newtonianos, porém pode ser empregado para os newtonianos também. Para os fluidos newtoniano, dilatante e pseudoplástico, a tensão de cisalhamento inicial será igual a 0 (SIMSCALE, 2021)

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Onde,

τ = tensão de cisalhamento

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento

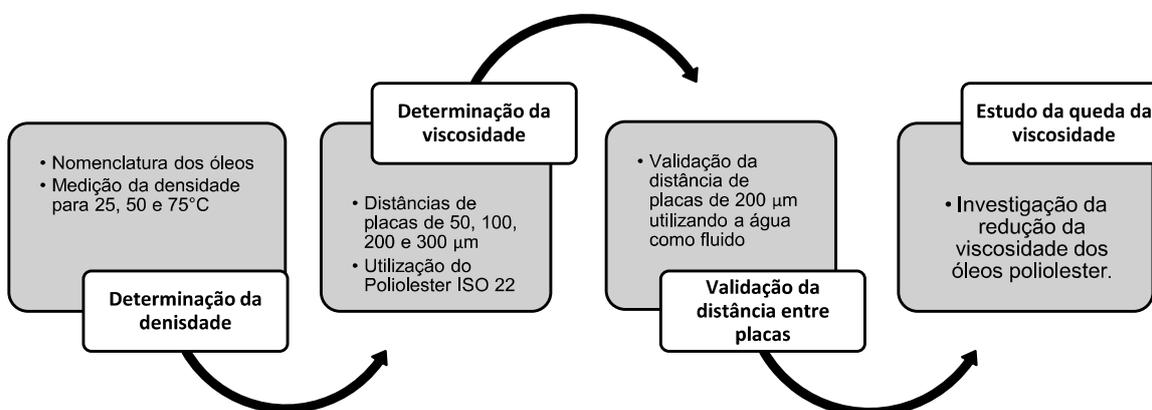
K = índice de consistência

n = índice de potência

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentados os óleos e o procedimento experimental utilizado na elaboração do presente trabalho. Inicialmente, empregou-se uma nomenclatura para facilitar a identificação dos óleos utilizados, realizou-se a medição da densidade para as temperaturas de 25, 50 e 75°C, efetuou a determinação da distância entre as placas para ser utilizada para o decorrer dos ensaios, a validação desta distância empregando como fluido a água e a realização dos ensaios.

Figura 10 - Fluxograma representando o procedimento experimental



Fonte: Autor, 2022.

4.1. OLÉOS LUBRIFICANTES

Para a realização do estudo foram utilizados os seguintes óleos: Alquilbenzeno ISO 02, Alquilbenzeno ISO 05, Alquilbenzeno ISO 22, Poliéster ISO 10, Poliéster ISO 22 e Óleo Mineral ISO 10.

A Tabela 1 apresenta as propriedades presentes na ficha de dados de cada óleo, assim como a nomenclatura que será utilizada no decorrer do presente trabalho. Destaca-se que não foi possível ter acesso à ficha de dados do óleo Mineral ISO 10. As densidades são para uma temperatura de 20 °C e a viscosidade medida em um viscosímetro de Ostwald.

Tabela 1– Valores da densidade, viscosidade e a nomenclatura adotada para os óleos utilizados

Óleo	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade (cSt)	Nomenclatura
Alquilbenzeno ISO 2	0,855 – 0,865	1,98 – 2,18	A-02
Alquilbenzeno ISO 5	0,845 – 0,870	4,40 – 4,80	A-05
Mineral ISO 10	-	-	M-10
Poliéster ISO 10	0,921 - 0,925	9,90 – 10,90	P-10
Poliéster ISO 22	0,944 – 0,950	20,50 – 22,70	P-22

Fonte: Autor, 2022.

4.2. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

De modo geral, para óleos lubrificantes a densidade é uma grandeza que possui relação inversa com a viscosidade. Para os óleos da Tabela 1 foram realizadas medições de densidade nas temperaturas de 25°C, 50°C e 75°C. Para tanto, utilizou-se uma chapa de aquecimento e agitação (Figura 11), no qual o óleo foi acondicionado em um kitassato e acomodado em um recipiente metálico contendo água para realizar a averiguação da temperatura. Com isso, os óleos foram mantidos nas temperaturas de interesse por 5 minutos até atingir o equilíbrio, após esse tempo, 5 mL de óleo eram aplicados em uma proveta de 10 mL através de uma pipeta de precisão. Assim, a proveta contendo óleo foi pesada em uma balança analítica. Tal procedimento foi repetido três vezes para cada óleo. Utilizou-se os valores da média entre as três medidas para cada óleo e os seus respectivos desvios padrões.

Figura 11 - Chapa de aquecimento, kitassato e recipiente utilizados para a determinação da densidade



Fonte: Autor, 2022.

4.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE FLUXO

Para determinar a relação da entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (curva de fluxo) e conseqüentemente o comportamento da viscosidade, foram realizados ensaios reológicos em um reômetro rotativo (Haake MARS II, Thermo Fisher Scientific) na configuração de placas paralelas (60 mm de diâmetro). Os testes foram realizados nas temperaturas de 25, 50 e 75°C, onde um banho termostático acoplado ao reômetro promove o aquecimento e mantém o patamar de temperatura na região do ensaio. Sendo assim, os ensaios eram realizados após as placas atingirem o equilíbrio térmico.

Como o óleo estava na temperatura ambiente (aproximadamente 22°C) antes da realização do ensaio, ele foi previamente aquecido até a temperatura de teste. Esse processo foi feito com auxílio de uma chapa de aquecimento (Figura 11). Alcançada a temperatura programada na chapa, esperava-se aproximadamente 5 minutos para o óleo alcançar o equilíbrio térmico com a chapa. Com uma micropipeta monocal (Labmate+ 100-1000 μL) era depositado o óleo na placa inferior do reômetro. O volume do óleo a ser utilizado para cada ensaio é definido pelo software do equipamento, por exemplo, para uma distância de 200 μm o volume foi de 580 μL (Tabela 2).

Tabela 2 - Taxa de cisalhamento alcançada e volume de óleo para as distâncias entre placas testadas

Distância entre placas(μm)	Taxa de cisalhamento (s^{-1})	Volume de amostra (μL)
50	90.000	145
100	40.000	290
200	20.000	580
300	15.000	870

Fonte: Autor - 2022

Os ensaios reológicos foram realizados de modo que a taxa de cisalhamento inicia em 0 s^{-1} até um valor previamente conhecido, o qual era determinado pela rotação máxima da placa superior e a distância entre as placas. Ao alcançar esse valor máximo, ocorre o processo de redução da taxa de cisalhamento com a mesma velocidade que ocorreu na etapa de aumento da taxa de cisalhamento. Com isso, a taxa de cisalhamento volta novamente para 0 s^{-1} . Esse procedimento foi realizado três vezes para diferentes amostras do mesmo óleo e foi utilizada a média dos valores obtidos.

4.3.1. Determinação da distância entre as placas

Com intuito de determinar a distância ideal entre placas, o óleo P22 foi submetido a ensaios reológicos prévios com uma distância entre placas de $50 \mu\text{m}$ na temperatura de 40°C . O objetivo era chegar a valores de taxa de cisalhamento de aproximadamente 10^5 s^{-1} , valor típico em compressores da indústria de refrigeração. Entretanto, ao analisar a curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para essa distância ente placas utilizando o óleo P22, percebe-se que os valores não eram próximos dos apresentados na ficha de dados do fabricante dos óleos, o que gerou dúvida em relação aos resultados obtidos para essa distância entre placas.

Ainda com objetivo de determinar a melhor distância entre placas, e observar o efeito da temperatura, foi realizado o teste descrito no parágrafo anterior com o óleo P-22 à temperatura de 40°C , já que essa é a temperatura que o fabricante faz a medição. Dessa forma, foram realizados ensaios reológicos com distância entre placas de 100, 200 e $300 \mu\text{m}$.

4.4. ADEQUAÇÃO DOS ENSAIOS REOLÓGICOS COM O MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

Ao obter as curvas de fluxo dos fluidos utilizados neste estudo, utilizou-se o modelo de Herschel-Bulkley para determinar qual comportamento o fluido mais se aproxima. Desta forma, utilizou-se o software Origin para plotar as curvas, as suas respectivas linhas de tendência e suas equações. Ao estabelecer a equação da potência, obtém-se o índice de potência “n” (Equação 5).

O índice de potência será diferente para os fluidos newtonianos, pseudoplástico e dilatante. Para o fluido newtoniano será igual 1, dilatante será maior do que 1 e pseudoplástico menor do que 1. Como nenhum fluido submetido aos ensaios necessitavam obter uma tensão inicial para começar o escoamento, foram desconsiderados os comportamentos Casson, Bingham e Plástico. (SIMSCALE, 2021)

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos no decorrer do estudo reológico. Por meio das curvas de viscosidade x taxa de cisalhamento, pode-se determinar qual o comportamento reológico que o fluido mais se aproxima.

Ao analisar os gráficos que serão apresentados a seguir, percebe-se que, com o aumento da temperatura, para a maior parte dos óleos, houve uma diminuição da viscosidade, fato esse que é explicado pelo ganho de energia das moléculas com o aumento da taxa de cisalhamento. Quando o líquido se aquece, as suas moléculas se excitam e começam a se mover devido ao aumento de energia e, em razão desse acréscimo de energia, ocorre o rompimento das ligações entre as moléculas, fazendo com que o fluido se torne menos viscoso. (ROHDE, 2018)

Assim, ao longo deste capítulo, será detalhado o comportamento reológico para os óleos A-02, A-05 e A-22, M-10 e P-10 e P-22.

5.1. DENSIDADE DOS ÓLEOS

Por meio do procedimento detalhado na seção 4.2, calculou-se a densidade de cada óleo utilizado no presente trabalho, a qual é exibida na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de densidade calculados

Óleo	Temp. (°C)	Densidade (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	Óleo	Temp. (°C)	Densidade (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)
	25	0,8764	0,0108		25	0,9864	0,0097
A-02	50	0,8608	0,0091	M-10	50	0,9480	0,0154
	75	0,8462	0,0121		75	0,9231	0,0119
	25	0,8450	0,0064		25	0,9213	0,0011
A-05	50	0,8278	0,0410	P-10	50	0,9191	0,0041
	75	0,8113	0,0072		75	0,9122	0,0052
	25	0,8520	0,0082		25	0,8520	0,0082
A-22	50	0,8423	0,0044	P-22	50	0,8423	0,0192
	75	0,8357	0,0011		75	0,8357	0,0237

Fonte: Autor, 2022.

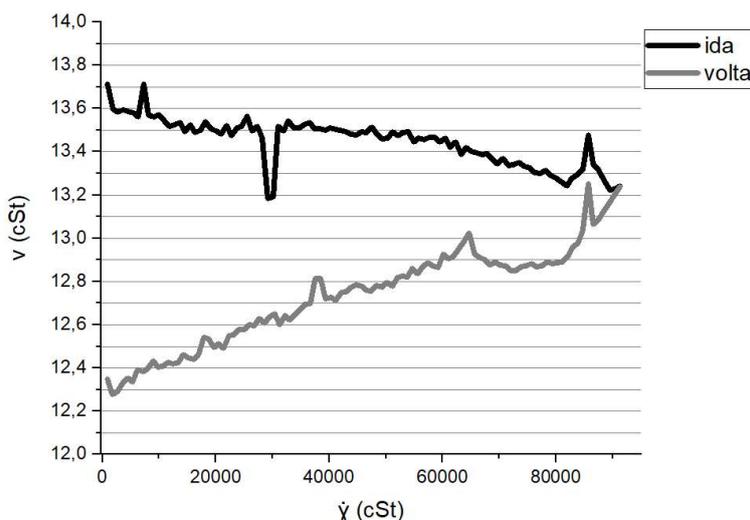
Nota-se, nos valores de densidade apresentados na Tabela 3, a diminuição da densidade conforme ocorre o aumento da temperatura. Essa influência da temperatura já era esperada conforme é mostrada nos trabalhos encontrados na literatura

5.2. DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE PLACAS NOS ENSAIOS REOLÓGICOS

A Figura 12 mostra o resultado típico do ensaio realizado para a distância entre placas igual 50 μm . Nota-se que os valores foram divergentes quando comparado com os dados apresentados na Tabela 1, onde a viscosidade está na faixa 20,50 e 22,70 cSt. Com isso, a viscosidade medida utilizando a distância entre placas de 50 μm , ficou, em média, 40% menor quando comparada com a exibida na ficha de dados do fornecedor.

Devido a essa grande diferença, realizou-se ensaios com outras distâncias entre placas, as quais foram de 0,1, 0,2 e 0,3 μm . Como pode ser observado na Figura 13, a melhor condição apresentada foi para o distância entre placas de 200 μm , pois obteve uma viscosidade próxima ao que era apresentado pela ficha de dados fornecida pela empresa, visto que a viscosidade variou entre 19,43 e 20,93 cSt, enquanto que os valores presentes na ficha de dados são entre 20,50 e 22,70 cSt. É importante ressaltar que os valores contidos na ficha de dados foram medidos de forma diferente dos apresentados pelo presente estudo, uma vez que este foi realizado através do reômetro de placas paralelas, enquanto que aquele foi realizado por meio de um viscosímetro de Oswald, podendo, dessa forma, caracterizar esse pequeno desvio do valor nominal da diferença entre as viscosidades.

Figura 12 - Representação do ensaio com 50 μm como distância entre placas

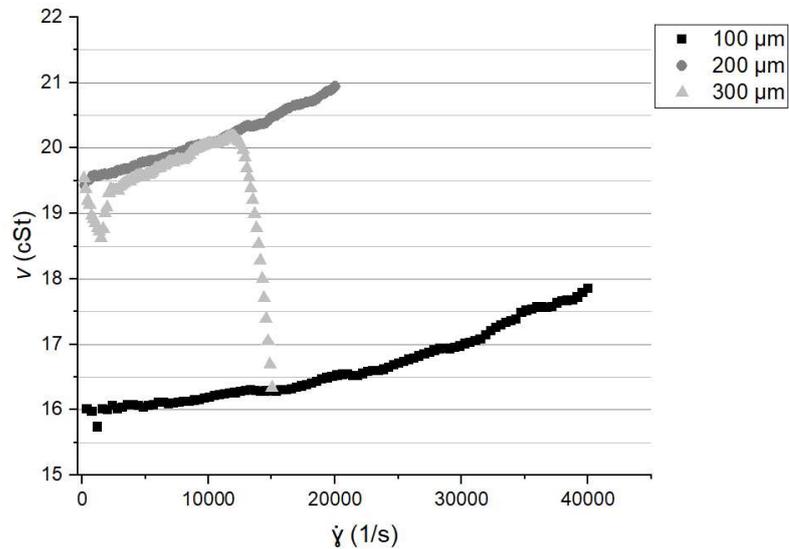


Fonte: Autor, 2022.

Ademais, devido à dependência da taxa de cisalhamento com a distância entre placas de 200 μm , o valor máximo possível para a taxa de cisalhamento

foi de 20.000s^{-1} , ao contrário do objetivo inicial de obter valores próximos a 10^5s^{-1} .

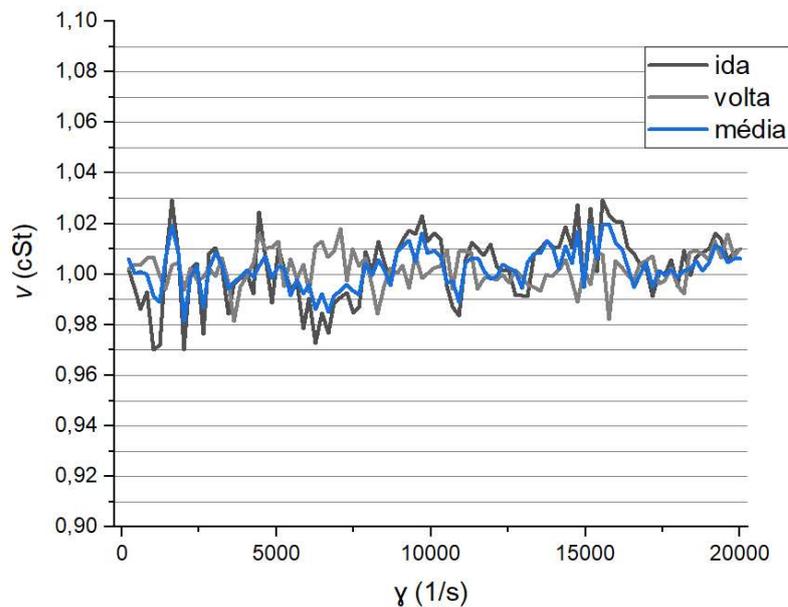
Figura 13 - Representação do ensaio com 100, 200 e 300 μm como distância entre placas



Fonte: Autor, 2022.

Uma vez definida a distância entre as placas de 200 μm como sendo a mais adequada (utilizando como fluido o óleo P-22), utilizou-se a água para confirmar se os resultados apresentados realmente eram confiáveis, uma vez que a viscosidade da água destilada é conhecida e se tratar de um fluido newtoniano. Assim sendo, submeteu-a ao ensaio reológico na temperatura de 25°C . Ao analisar os resultados na Figura 14, verifica-se que o ensaio realizado para a água possui comportamento newtoniano e viscosidade próxima a 1,0 cSt, conforme esperado/desejado.

Figura 14 - Comportamento da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para a água com a distância entre placas de 200 μm



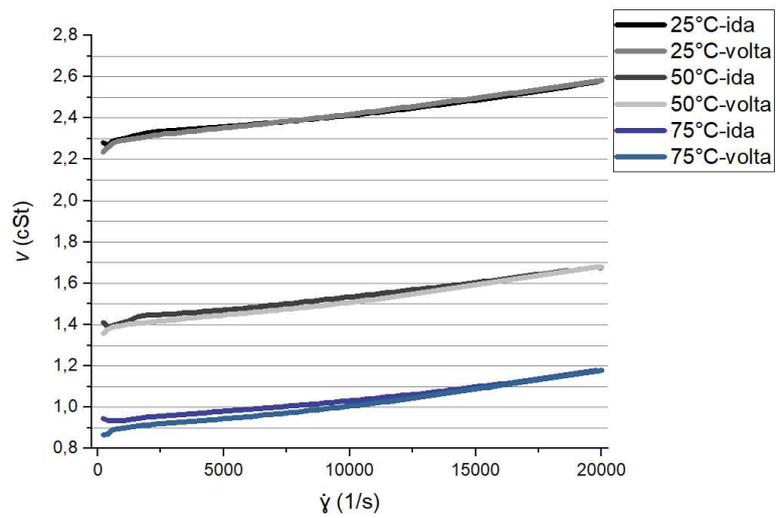
Fonte: Autor, 2022.

Com isso, os resultados mostraram-se adequados a metodologia de ensaio, e a distância entre as placas definida como padrão para dar prosseguimento aos ensaios foi de 200 μm .

5.3. TESTES DE REOLÓGICOS COM OS ÓLEOS

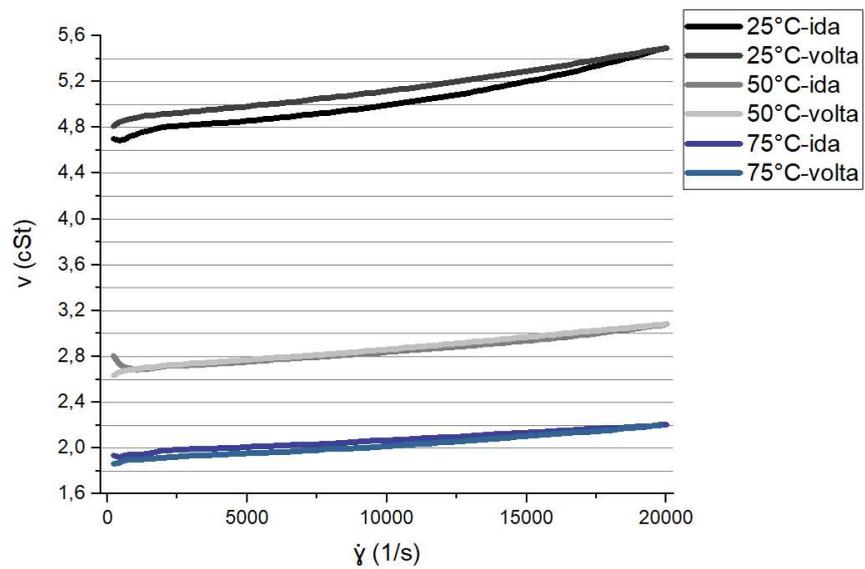
As Figuras 15, 16 e 17 mostram as curvas de fluxo dos óleos A-02, A-05 e A-22 nas três temperaturas medidas. Nos gráficos a nomenclatura ida significa o aumento da taxa de cisalhamento até 20.000 s^{-1} , enquanto a volta é a diminuição da taxa de cisalhamento de 20.000 s^{-1} até 0 s^{-1}

Figura 15 - Resultado do ensaio realizado para o óleo A-02



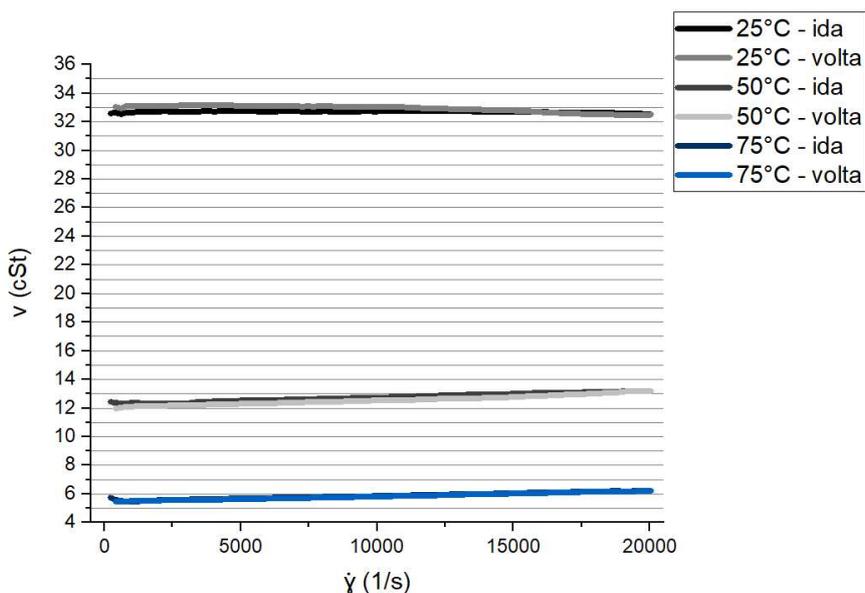
Fonte: Autor, 2022.

Figura 16 - Resultado do ensaio realizado para o óleo A-05



Fonte: Autor, 2022.

Figura 17 - Resultado do ensaio realizado para o óleo A-22



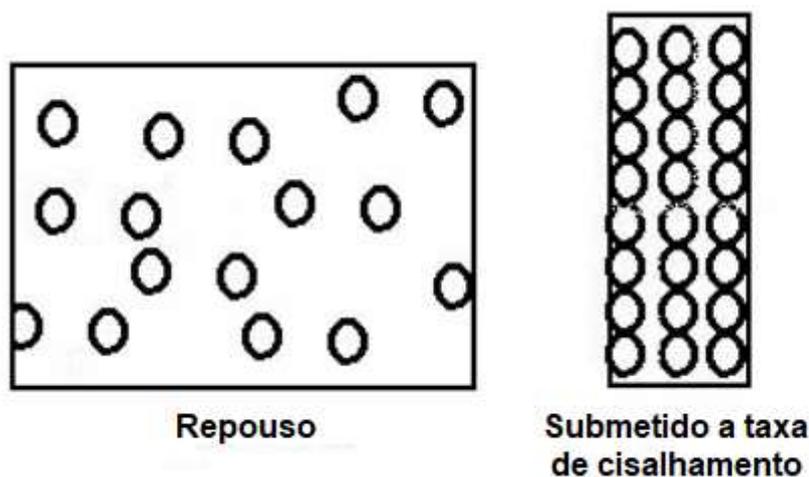
Fonte: Autor, 2022.

Por meio das Figura 15 e Figura 16, percebe-se que os óleos A-02 e A-05, respectivamente possuem um comportamento levemente dilatante. Segundo Reynolds, inicialmente, quando ainda estão em repouso, as moléculas do óleo estão bem separadas uma das outras. (MACHADO, 2002) Entretanto, com o aumento da taxa de cisalhamento, ocorre uma aproximação das suas moléculas, causando um aumento da resistência ao fluxo, ou seja, uma elevação da viscosidade, consoante ao que é mostrado na Figura 18 .

Ademais, ressalta-se que para a temperatura de 25°C, o óleo A-05, além de possuir o comportamento dilatante, possui também um comportamento reopético. Nota-se que a curva de ida possui valores de viscosidade inferiores se comparada com a de volta, isso porque o fluido, com o aumento da taxa de cisalhamento, aumenta a sua viscosidade, já que ocorre o arranjo das moléculas. Porém, tais valores de viscosidade são inferiores aos da curva de volta. Para a volta, o fluido apresenta uma estrutura mais resistente ao movimento quando comparado com a curva de ida.

Esse comportamento some com o aumento da temperatura, já que as moléculas irão se afastar uma das outras. Dessa forma, as forças de atração entre as moléculas diminuí, o que faz com que exista um movimento mais facilitado e, conseqüentemente, ocorra a diminuição da temperatura.

Figura 18 - Ilustração das moléculas de um fluido em estado de repouso e submetido a taxa de cisalhamento



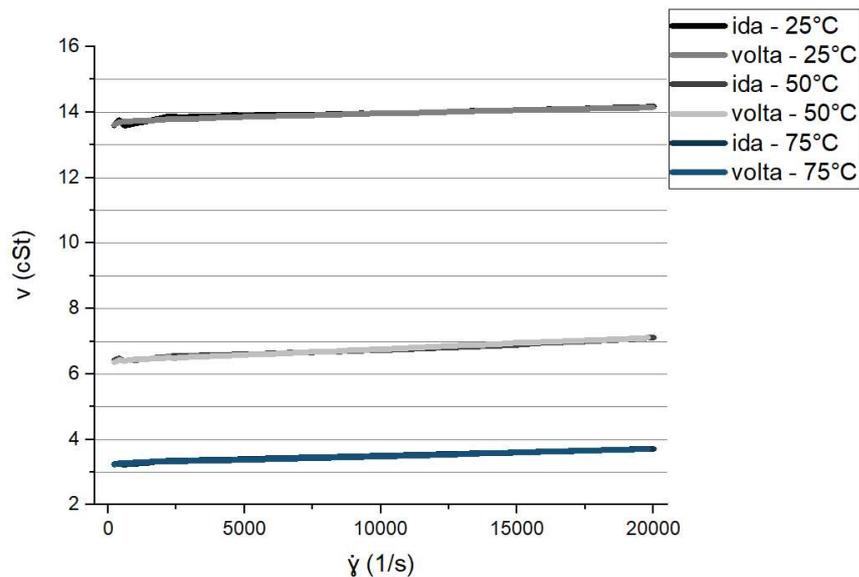
Fonte: BARRA, 2014.

Porém, ao analisar o gráfico referente ao A-22 (Figura 17), nota-se que ele não possui comportamento similar ao apresentado pelo A-2 e A-5. Ou seja, para as temperaturas de 25°C, o comportamento do fluido é pseudoplástico. Ao verificar as curvas de 50°C e 75°C, nota-se que estas apresentam o mesmo comportamento se comparado com as curvas dos demais óleos Alquilbenzenos. Observa-se que o óleo possui comportamento muito próximo a um fluido newtoniano, porém com uma leve inclinação da reta.

O efeito de reopexia observado para a temperatura de 25°C do óleo A-05 não é observado para nenhuma temperatura do A-22. Isso porque o óleo possui uma viscosidade superior e uma cadeia molecular maior, fazendo com que a reopexia seja insignificante, já que não ocorre nenhuma construção molecular.

Ao contrário do comportamento dos outros óleos citados até o momento, o óleo M-10 possui comportamento praticamente newtoniano, isto porque a sua viscosidade não se altera, ou possui valores muito próximos, para diferentes valores de taxa de cisalhamento para a mesma temperatura. Ao passo que a temperatura se altera, percebe-se que a sua viscosidade diminui consideravelmente (Figura 19), característica esta que já é amplamente conhecida na literatura para os óleos lubrificantes.

Figura 19 - Representação do ensaio realizado para o óleo M-10



Fonte: Autor, 2022.

As Figura 20 e Figura 21 demonstram o comportamento reológico dos óleos P-10 e P-22 respectivamente. Estes possuem comportamento semelhante, uma vez que, para as temperaturas de 25°C e 50°C na curva de “ida”, até valores de taxa de cisalhamento próximos a 15.000 s⁻¹ têm comportamento newtoniano, embora possua uma leve inclinação. Mas, a partir da taxa de cisalhamento de 15.000 s⁻¹, aproximadamente, ocorre uma queda brusca na viscosidade e esse processo se mantém até atingir a taxa de cisalhamento máxima do teste (20.000 s⁻¹). A partir daí, o teste entra na fase de redução da taxa de cisalhamento (volta), contudo a viscosidade continua a diminuir, até que, por volta de 15.000 s⁻¹, o comportamento volta a ser newtoniano. Sendo assim, os óleos lubrificantes minerais apresentaram comportamento pseudoplástico em taxas de cisalhamento acima de 15.000 s⁻¹.

Entretanto, para a temperatura de 75°C, esse comportamento não é observado, na verdade, nota-se que o óleo possuiu comportamento newtoniano em toda faixa de taxa de cisalhamento testada.

Figura 20 - Resultado do ensaio realizado para o óleo P-10

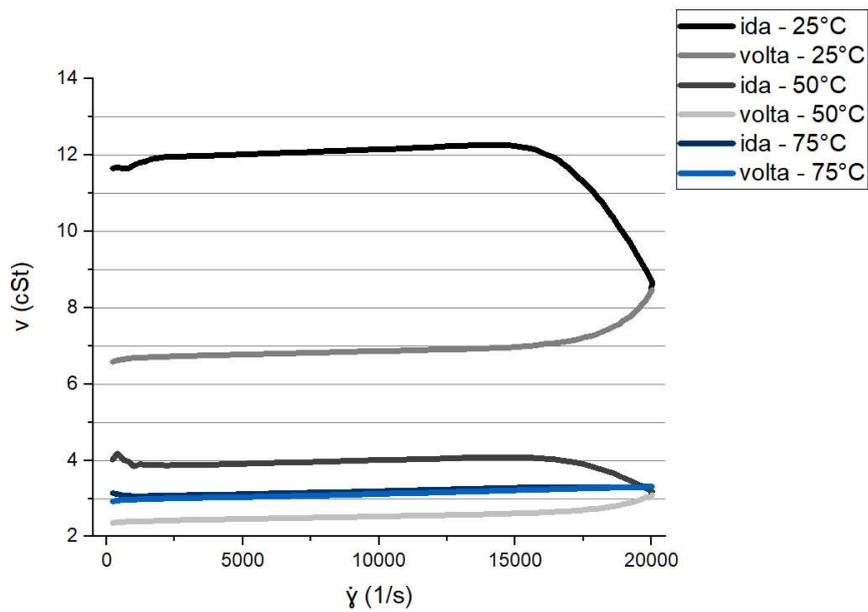
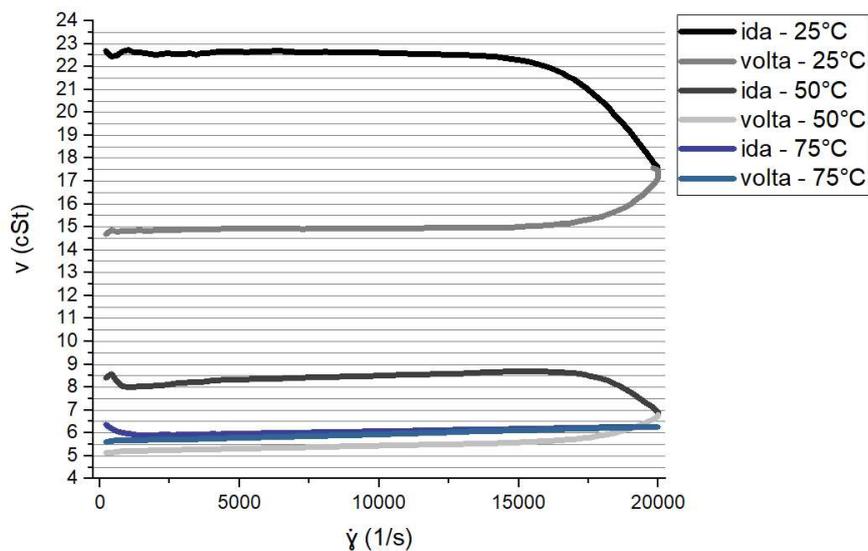


Figura 21 - Resultado do ensaio realizado para o óleo P-22



Do ponto vista tribológico, os resultados apresentados até aqui mostram uma boa estabilidade dos óleos lubrificantes, mesmo em altas taxas de cisalhamento, exceto para os óleos poliolesteres que apresentaram comportamento pseudoplástico a partir de 15.000 s^{-1} nas temperaturas de 25 e 50 °C. Logo, para projetos de mancal com os óleos Alquilbenzenos e Minerais em condições de operação até 75 °C e 20.000 s^{-1} , a viscosidade pode ser considerada uma função somente da temperatura.

Para os óleos Poliesteres, em temperaturas até 50 °C e taxa de cisalhamento acima de 15.000 s⁻¹, a redução de viscosidade pode ser suficiente para afetar o desempenho do óleo lubrificante, especialmente reduzir sua capacidade de gerar lubrificação hidrodinâmica.

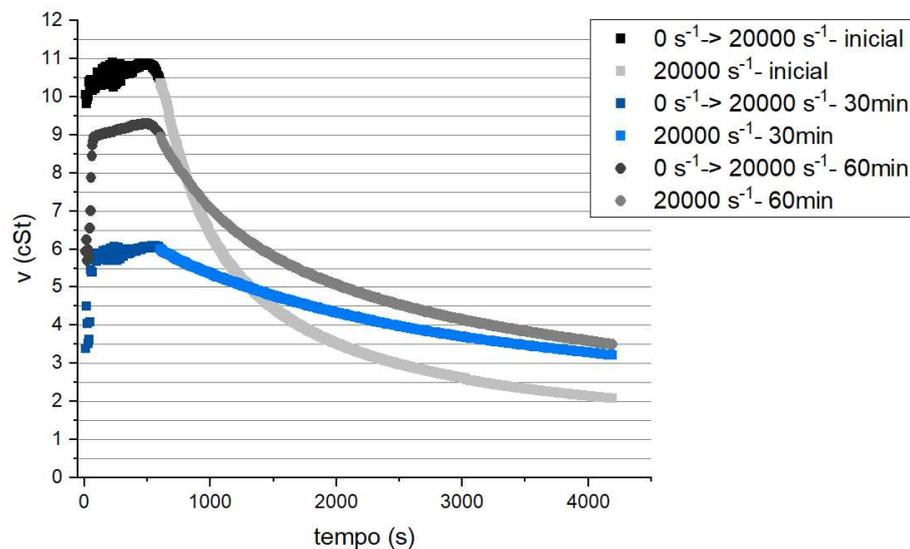
Com objetivo de entender mais detalhadamente o comportamento pseudoplástico dos óleos Poliesteres foram realizados testes onde, após se atingir a taxa de cisalhamento de 20.000 s⁻¹ (acima da taxa de cisalhamento crítica, 15.000 s⁻¹), essa taxa era mantida constante por uma hora.

5.4. ESTUDO DA REDUÇÃO DA VISCOSIDADE

Como visto na sessão anterior, para os dois óleos Poliesteres, houve uma redução brusca da viscosidade a partir da taxa de cisalhamento de, aproximadamente, 15.000 s⁻¹, a qual voltou a ter um comportamento newtoniano para taxas inferiores a 15.000 s⁻¹ (curva de volta).

Desta forma, com o intuito de verificar a dependência dos fluidos P-10 e P-22 com o tempo, realizou-se um estudo com o óleo P-10 (Figura 22), no qual submeteu-o a taxas de cisalhamento até 20.000 s⁻¹ e, após chegar nessa taxa, foi mantido o fluido durante 60 minutos ininterruptos. Além disso, a mesma amostra de óleo foi mantida em repouso na placa inferior do reômetro durante 30 minutos para observar se o óleo iria recuperar a sua viscosidade e, após esse intervalo, foi ensaiado novamente a mesma amostra de óleo que foi mantida no reômetro. Este mesmo procedimento foi realizado novamente com outra amostra, a qual foi mantida na placa inferior do reômetro por 60 minutos de forma estacionária.

Figura 22 - Representação do estudo realizado com o óleo P-10

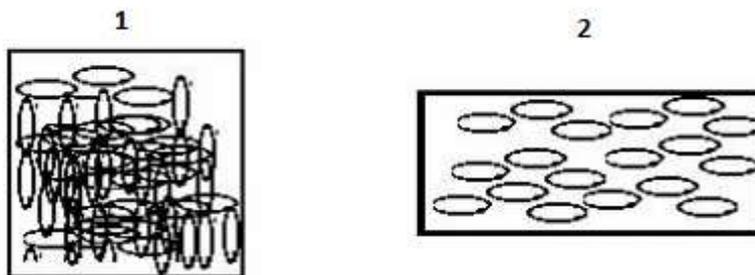


Fonte: Autor, 2022.

Com isso, nota-se que os fluidos Poliolesteres possuem uma dependência com o tempo. Estes ensaios realizados apresentam o mesmo comportamento de ensaios anteriores que já foram abordados, que, a partir da taxa de cisalhamento de 15.000 s^{-1} , evidenciam uma diminuição abrupta da viscosidade, a qual permanece para a taxa igual a 20.000 s^{-1} e continua durante o período em que a taxa de cisalhamento permanece constante durante o tempo.

Tal comportamento caracterizado pode ser explicado em virtude da diferença de estados das moléculas do fluido. Inicialmente, para taxas de cisalhamento pequenas, as partículas estão em estado de repouso e orientadas de forma aleatória e próximas umas das outras (1), o que causa um aumento da viscosidade, pois a resistência para ocorrer a movimentação do fluido é maior. Ao passo que é alcançada a taxa de cisalhamento de, aproximadamente, 15.000 s^{-1} , as partículas não suportam o esforço que está sendo empregado nelas e, conseqüentemente, ocorre uma diminuição da viscosidade, assumindo uma orientação preferencial na direção do escoamento (2). (Barra, 2014)

Figura 23 - Ilustração das moléculas do óleo antes e depois de adquirirem uma orientação. (1) Taxas de cisalhamento menores que 15.000 s^{-1} .
(2) Taxas de cisalhamento superiores a 15.000 s^{-1}



Fonte: Barra, 2014.

Ademais, mediante a Figura 22, comprova-se a real dependência do fluido com o tempo. Observa-se que para o intervalo de 30 minutos, a viscosidade inicial foi de 3,38 cSt e, após a estabilidade, entre 5,38 e 6,07 cSt até taxas de 20.000 s^{-1} , enquanto que a curva inicial (sem o intervalo de tempo) variou entre 9,81 e 10,87 cSt. Quando a taxa de cisalhamento permaneceu constante, ocorreu a diminuição da viscosidade, como já comentado anteriormente, para as duas condições. Porém, percebe-se que o decaimento da viscosidade da curva inicial ocorreu de forma mais repentina se comparada com a curva de 30 minutos.

Além disso, pode-se destacar o comportamento da curva que demonstra o intervalo de 60 minutos. Para este intervalo, a viscosidade obteve estabilidade para o intervalo entre 8,93 e 9,29 cSt e decaiu quando a taxa de cisalhamento se manteve constante, finalizando o ensaio com viscosidade muito próxima à curva de 30 minutos.

Outrossim, outra teoria que é pertinente para a explicação da viscosidade a partir de uma determinada taxa de cisalhamento é a tixotropia. Conforme é descrito no artigo “Tixotropy”, Mewis (2009), é possível afirmar que os óleos poliéster estudados são tixotrópicos. Tal afirmação pode ser comprovada pela dependência do tempo desses fluidos e, aquela redução brusca na viscosidade a partir de uma determinada taxa de cisalhamento, pode ser entendida através da microestrutura do óleo. Por causa das fracas forças de atração entre as moléculas, haverá a formação de flocos que normalmente evoluem para uma rede de partículas que preenche o espaço. As ligações entre as partículas são,

no entanto, fracas o suficiente para serem rompidas pelas tensões mecânicas que ocorrem durante o avanço da taxa de cisalhamento. O resultado é que, durante o fluxo, a rede se quebra em flocos separados, que diminuem ainda mais de tamanho quando a taxa de deformação é aumentada, ocasionando na redução da viscosidade. A redução da taxa de cisalhamento pode causar o crescimento dos flocos, fato esse que não se observa nos ensaios realizados; entretanto, ao passo que é deixado o fluido sobre a placa sem nenhuma força atuante, ou seja, sem o fluxo de cisalhamento, haverá a reconstrução da rede de partículas, evento esse que foi constatado nos testes realizados.

Com isso, conclui-se que os óleos P-10 e P-22 são dependentes do tempo, pois à medida que o óleo permanece repousando na placa inferior, o mesmo recupera parte da viscosidade que havia perdido no ensaio inicial. Com o intervalo de 30 minutos, houve uma recuperação da viscosidade de 55,42% quando comparada com os valores médios da curva inicial (parte estável), enquanto que, para o intervalo de 60 minutos, recuperou-se cerca de 86,48%.

Esta recuperação da viscosidade acontece devido ao rearranjo das moléculas do fluido e, desse modo, há um novo rearranjo de forma aleatória das moléculas. Embora estejam mais orientadas se comparadas com as moléculas do óleo que não foi ensaiado, a recuperação das moléculas é o suficiente para ocorrer o aumento da viscosidade.

5.5. MODELOS MATEMÁTICOS

Até aqui, as análises de comportamento reológico foram realizadas através da forma das curvas de fluxo. Nessa seção, essa análise será feita utilizando o modelo matemático de Herschel-Bulkley. Basicamente, determinou-se a equação da potência para as curvas dos óleos M-10 e A-02, A-05 e A-22, onde foi delimitada a curva apenas de ida, ou seja, de 0 a 20.000 s⁻¹. Por intermédio do índice de potência, é possível inferir sobre o comportamento do fluido para uma dada temperatura.

Por meio da Tabela 4, pode-se observar que, utilizando o modelo matemático proposto pela Equação 3, a maior parte dos óleos demonstraram possuir comportamento dilatante para a temperatura os quais foram submetidos,

onde apenas o A-22 apresentou comportamento pseudoplástico para a temperatura de 25°C. Contudo, o valor do expoente é muito próximo de 1, o que configura comportamento levemente pseudoplástico. O mesmo raciocínio se aplica para o comportamento dilatante, que, embora apresentaram um expoente maior que 1 esse valor é muito próximo da unidade, revelando um comportamento newtoniano.

Tabela 4 - Valores da equação obtida e o comportamento dos óleos mineral e alquilbenzenos para as temperaturas de 25, 50 e 75°C

Óleo	Temp. (°C)	Equação (potência)	R ²	Comportamento
M-10	25	$12,84 \times \gamma^{1,009}$	1	Dilatante
	50	$5,24 \times \gamma^{1,028}$	0,99	Dilatante
	75	$2,53 \times \gamma^{1,036}$	0,99	Dilatante
A-02	25	$1,79 \times \gamma^{1,033}$	0,99	Dilatante
	50	$0,96 \times \gamma^{1,051}$	0,99	Dilatante
	75	$0,54 \times \gamma^{1,071}$	0,99	Dilatante
A-05	25	$3,67 \times \gamma^{1,036}$	0,99	Dilatante
	50	$2,05 \times \gamma^{1,036}$	0,99	Dilatante
	75	$1,44 \times \gamma^{1,039}$	0,99	Dilatante
A-22	25	$33,60 \times \gamma^{0,99}$	0,99	Pseudoplástico
	50	$10,42 \times \gamma^{1,02}$	0,99	Dilatante
	75	$4,30 \times \gamma^{1,034}$	0,99	Dilatante

Fonte: Autor, 2022.

Para os óleos Poliolesteres, devido à queda brusca que ocorre em sua viscosidade para taxas de cisalhamento, calculou-se duas equações diferentes, utilizando, como intervalo de pontos, os dados contidos entre 0 e 15.000s⁻¹ (ida) e 15.000 s⁻¹ e 20.000 s⁻¹ (volta). Desta forma é possível caracterizar os diferentes comportamentos existentes para o óleo sob uma mesma curva representada no gráfico.

Tabela 5 - Valores da equação obtida e o comportamento dos óleos poliésteres para as temperaturas de 25, 50 e 75°C

Óleo	Temp. (°C)	Ida	R ²	Volta	R ²	Comportamento (ida/volta)
P-10	25	$10,7 \times \gamma^{1,013}$	1,00	$3E10 \times \gamma^{-1,23}$	0,97	Dilatante / Pseudoplástico
	50	$3,65 \times \gamma^{1,0099}$	0,99	$1E0,8 \times \gamma^{0,75}$	0,94	Dilatante / Pseudoplástico
	75	$2,60 \times \gamma^{1,022}$	0,99	$2,419 \times \gamma^{1,031}$	1,00	Dilatante / Dilatante
P-22	25	$22,85 \times \gamma^{0,99}$	0,99	$5E0,7 \times \gamma^{-0,504}$	0,95	Pseudoplástico / Pseudoplástico
	50	$7,17 \times \gamma^{1,018}$	0,99	$9E0,8 \times \gamma^{-0,88}$	0,94	Dilatante / Pseudoplástico
	75	$5,76 \times \gamma^{1,0055}$	0,99	$3,1813 \times \gamma^{1,056}$	0,99	Dilatante / Dilatante

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 5, na última coluna, expõe qual o comportamento para valores de 0 até 15.000 s⁻¹ e, posteriormente, de 15.000 s⁻¹ até 20.000 s⁻¹. Assim como foi comentado para os óleos alquilbenzenos e minerais, os poliésteres, para valores de 0 até 15.000s⁻¹, possuem valores próximos a 1, ou seja, têm comportamento próximo a de um fluido newtoniano, embora, como observa-se na tabela, não é descrito tal comportamento para nenhuma das temperaturas as quais os fluidos foram testados.

Além disso, ao analisar o comportamento existente para as temperaturas de 25 e 50°C para a equação referente ao intervalo entre 15.000 e 20.000 s⁻¹, verifica-se que o óleo possui um comportamento pseudoplástico.

Ademais, ao examinar a temperatura de 75°C para ambos os fluidos, constata-se que não há a queda brusca da viscosidade como foi vista para as demais temperaturas, comportando-se, desta forma, como um fluido dilatante durante todo o ensaio.

Entretanto, é válido mencionar que a avaliação realizada que é mostrada nesse tópico foi realizada de forma individualizada para as curvas de ida e volta. Caso seja avaliada de forma conjunta (curva de ida e curva de volta), para as temperaturas de 25 e 50°C, os óleos P-10 e P-22 terão comportamento tixotrópico e, com isso, é possível realizar a avaliação da dependência do tempo desses fluidos.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco principal a avaliação reológica à altas taxas de cisalhamento de óleos utilizados na indústria de refrigeração, utilizando óleos Alquilbenzenos, Mineral e Poliolesters, nas temperaturas de 25, 50 e 75°C. Além disso, anteriormente aos ensaios realizados para os óleos, foi definido os parâmetros de ensaio, como distância entre placas e volume amostral, utilizando como fluido a água.

Com base nos dados obtidos com as caracterizações reológicas e as análises, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Para o reômetro de placas paralelas utilizado para a realização deste trabalho, concluiu-se que a distância entre placas e volume ideais eram de 200 μm e 580 μL , respectivamente.
- Os óleos Alquilbenzenos e Mineral possuem comportamento majoritariamente newtoniano, embora apresentam leves variações na sua viscosidade. De forma visual, classificou-se os óleos A-02, A-05 e P-10 como dilatantes, ao passo que o A-22 foi considerado como pseudoplástico para a temperatura de 25°C e dilatante para a temperatura de 50 e 75°C. Entretanto, nota-se que, de acordo com os modelos matemáticos, os óleos, para todas as temperaturas, possuíram valores próximos a de um fluido newtonianos para as taxas de cisalhamento aplicadas, podendo, assim, considera-los como newtonianos.
- Com a análise realizada para avaliar a mudança do comportamento brusco da viscosidade a partir de taxas de cisalhamento próximas a 15.000 s^{-1} , percebe-se que os óleos P-10 e P-22 possuem dependência com o tempo. Como com o passar do tempo ocorre uma recuperação da viscosidade, estes óleos podem ser considerados como fluidos tixotrópicos

7. REFERÊNCIAS

- ALTEREVO. **Formulation of Lubricants: Base Oils**. 2016. Disponível em: <http://alterevoingenieros.blogspot.com/2016/03/formulation-of-lubricants-base-oils.html>. Acesso em: 11 dez. 2021.
- AYLOR, C.M. **Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability**. *Wear*, 221, p.1–8, 1998.
- BARNES, Howard A.. **A Handbook of Elementary Rheology**. Cardiff: Cambrian Printers, 2000.
- BARRA, GUILHERME. **Fundamentos de Reologia de Materiais Poliméricos**. 2014. Florianópolis. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/professores/edler/ENG%20520%20McFluidos/Fundamentos%20Reologia%20polimeros.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- BARRON, Andrew R. **Physical Methods in Chemistry and Nano Science**. Texas: Connexions, 2012. 702 p.
- BART, Jan CJ et al. **Renewable lubricants. Biolubricants: science and technology**, p. 1-9, 2013.
- BRAGA, Adriano Cesar Calandrini. **Influência da Temperatura e do Tamanho de Partículas no Comportamento Reológico do Suco de Abacaxi “pérola” (ananas comosus (L.) merr.)**. 2007. 74 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- Carreteiro, R. P.; Belmiro, P. N. A. **Lubrificantes e Lubrificação Industrial**. 1. Ed. Editora Interciência Ltda e Instituto Brasileiro de Petróleo: Rio de Janeiro, 2006.
- CUNHA, Rodrigo Carvalho. **Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada pela Análise de Vibrações**. 2005. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA.
- GALVÃO, Marcos Moura. **Análise do Desempenho de Mancais Axiais Hidrodinâmicos de Sapatas Setoriais Pivotadas**. 2016. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- GOTRO, Jeffrey. **Rheology of Thermosets Part 2: Rheometers**. Disponível em: <https://polymerinnovationblog.com/rheology-thermosets-part-2-rheometers/>. Acesso em: 13 out. 2021.
- HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. **Tribology International**, [S.L.], v. 135, p. 389-396, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.024>.
- JONSSON, Ulf. **Elastohydrodynamic Lubrication and Lubricant Rheology in Refrigeration Compressors**. 1998. 32 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica de Lulea. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991590/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 13 set. 2021.
- Lira Nunez, David. (2020). Mancais de deslizamento: seleção correta para um projeto de máquina confiável. 10.22541/au.159595287.71044407/v2.
- Machado, Amanda Moreira. (2022). **Estudo comparativo entre os parâmetros reológicos de tintas acrílicas arquitetônicas**. *Ambiente Construído*. 22. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100589>.
- MACHADO, José Carlos Vieira. **REOLOGIA E ESCOAMENTO DE FLUIDOS - Ênfase na Indústria de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

- MARCELINO NETO, Moisés A.. **Solubility, density and viscosity of mixtures of isobutane (R-600a) and a linear alkylbenzene lubricant oil**. Science Direct, [s. l], v. 292, n. 1, p. 7-12, 13 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2009.12.029>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- MASSEY, B. S.; WARD-SMITH, A. J. **Mechanics of Fluids**. 8. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2006.
- MENEZES, Pradeep L. et al. (Ed.). **Tribology for scientists and engineers**. New York: Springer, 2013.
- MEWIS, Jan; WAGNER, Norman J.. Thixotropy. **Advances In Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 147-148, p. 214-227, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.005>.
- MOBIL. **Use of Lubricants in Systems Using Natural Refrigerants**. Disponível em: <https://www.mobil.com/industrial/~media/files/global/us/industrial/misc/natural-refrigerants-whitepaper.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.
- MOBIL. **Use of Lubricants in Systems Using Natural Refrigerants**. Disponível em: <https://www.mobil.com/industrial/~media/files/global/us/industrial/misc/natural-refrigerants-whitepaper.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- MSPC (org.). **Fluidos não Newtonianos**. Disponível em: <https://www.mspc.eng.br/dir80/fldd01.php>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- N.MARSH, Kenneth. **Review of Thermodynamic Properties of Refrigerants + Lubricant Oils**. Science Direct, Christchurch, 31 maio 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(02)00025-0). Acesso em: 11 out. 2021.
- Rizvi, S. Q. A. **A Comprehensive Review et Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design**. ASTM: West Conshohocken, 2009.
- ROHDE, Alison. **How Does Changing the Temperature Affect the Viscosity & Surface Tension of a Liquid?** 2018. Disponível em: <https://sciencing.com/changing-temperature-affect-viscosity-surface-tension-liquid-16797.html>. Acesso em: 02 out. 2021.
- SÁNCHEZ-ALVARRACÍN, Carlos. **Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration**. Recycling, Cuenca, v. 6, n. 1, p. 10, 2 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling6010010>
- SCHRAMM, Gebhard. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. 2. ed. Germany: Thermo Electron (Karlsruhe) GmbH, 2004. Disponível em: <https://www.ifi.es/wp-content/uploads/2021/06/Rheology-Book.pdf>. Acesso em: 09 out. 2021.
- SIMSCALE (org.). **Non-Newtonian Models**. Disponível em: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/materials/non-newtonian-models/>. Acesso em: 15 nov. 2021.
- STEFFE, James F.. **Reological Methods in Food Process Engineering**. 2. ed. Michigan: Second Printing, 1996.
- TROUT, Jonathan. **Synthetic Oil: What Consumers Need to Know**. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/synthetic-oil-31800>. Acesso em: 11 out. 2021.