



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VALÉRIA MARIANA FLORÊNCIO SILVA

**SÍNTESE E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE NANOFLUIDO À BASE DE
ÓXIDO DE GRAFENO**

Recife
2025

VALÉRIA MARIANA FLORÊNCIO SILVA

**SÍNTESE E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE NANOFLUIDO À BASE DE
ÓXIDO DE GRAFENO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr^a Janaína Moreira de Meneses

Coorientador (a): Dr^a Adriana Soares De Carvalho

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Valéria Mariana Florêncio.

Síntese e avaliação das propriedades de nanofluido à base de óxido de grafeno /
Valéria Mariana Florêncio Silva. - Recife, 2025.

49 p. : il., tab.

Orientador(a): Janaína Moreira de Meneses

Coorientador(a): Adriana Soares de Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2025.

1. Nanofluidos. 2. Óxido de grafeno. 3. Propriedades termofísicas. 4.
Estabilidade. I. Meneses, Janaína Moreira de. (Orientação). II. Carvalho, Adriana
Soares de. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

VALÉRIA MARIANA FLORÊNCIO SILVA

**SÍNTESE E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE NANOFLUIDO À BASE DE
ÓXIDO DE GRAFENO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, Centro de
Tecnologia e Geociências, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 17/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a Janaína Moreira de Meneses (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Dr^a Adriana Soares de Carvalho (Coorientadora)
Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE)

Prof. Dr. Álvaro Antonio Ochoa Villa (Examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

Prof^a. Dr^a. Marcele Elisa Fontana (Examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

Dedico esse trabalho à minha avó Sebastiana (*in memoriam*), matriarca de minha família, que nos mostrou força e coragem por toda a sua vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria e Daniel, pelo constante amor, apoio e paciência durante toda minha jornada pessoal e acadêmica, especialmente nos momentos mais árduos. Vocês foram fundamentais na minha formação como pessoa, sua dedicação em me proporcionar uma educação de qualidade e fé em minha carreira foram o que me trouxe até aqui e, por isso, serei eternamente grata.

Aos meus irmãos Chaves e Bob, pelo amor incondicional, conforto e risadas arrancadas durante a escrita desse trabalho.

À minha tia Maria Zuleide, minhas primas Nathalia e Gabriela, e à toda minha família, pela torcida e momentos de comunhão e diversão em nossas aventuras, que me ensinaram o valor da confiança e amizade.

À minha orientadora, prof.^a Dra. Janaína, meu imenso agradecimento pela significativa contribuição na minha formação acadêmica, tanto nesse trabalho como nas disciplinas cursadas, pelos valiosos conselhos, bom humor, compreensão e humanidade durante todo o processo de escrita deste TCC.

Aos meus orientadores de iniciação científica, Prof Dr. Eduardo Padrón e Dr^a. Adriana Carvalho, por me inserirem no meio científico de forma muito receptiva e acolhedora e por toda a orientação, essencial em minha formação pessoal e acadêmica. Sou imensamente grata pela confiança no meu trabalho, compreensão, pelas oportunidades e por comporem um ambiente tão colaborativo e amistoso quanto o nosso grupo de pesquisa Mesomag.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica, do Mesomag e do Departamento de Física, por tornarem essa jornada mais leve com sua amizade e incontáveis conversas, repletas de desabafos e risadas, que mantiveram minha sanidade mental quando achei que seria impossível.

Ao prof Wilson, pela disponibilidade e solicitude para realizar as medidas de viscosidade deste trabalho. Sua breve, mas valiosa orientação foi essencial na construção desse trabalho e de minha visão como pesquisadora.

Por fim, à Dâmara pela disponibilidade e orientação nas medidas de propriedades térmicas e aos professores Ângelo e Álvaro, por contribuir no meu conhecimento para a escrita desse trabalho.

RESUMO

Fluidos são extensivamente utilizados como meio de transferência térmica nas indústrias automobilística, química, aeronáutica e eletrônica, através de trocadores de calor. A eficiência de troca térmica desse meio depende de fatores como: propriedades do fluido, temperatura, etc. A baixíssima condutividade térmica de fluidos convencionais como a água estimula a busca por fluidos de trabalho mais eficientes. Este trabalho tem como objetivos sintetizar e avaliar as propriedades termofísicas e estabilidade de um nanofluido de óxido de grafeno aquoso, para melhorar a condutividade térmica da água. A proposta, em consonância com a ODS n.º 9, possibilita o projeto de sistemas térmicos mais compactos e eficientes e representa uma oportunidade de economia de recursos. Para a síntese do nanofluido, foi utilizado o método de Hummers modificado e as amostras preparadas com concentrações de 0,25% e 0,5% m/m. A condutividade térmica foi estimada a partir de modelos disponíveis em literatura e de revisão bibliográfica, a densidade foi calculada a partir da pesagem das amostras e volume já estabelecido e a curva de viscosidade foi plotada em função da taxa de deformação do fluido, que apresentou comportamento pseudoplástico em todo o intervalo avaliado. As amostras também foram observadas ao longo de 60 dias, apresentando sedimentação natural somente a partir do 47º dia, indicando ótima estabilidade estática. No entanto, a baixa velocidade de sedimentação na centrifugação (menor do que 500 RPM) demonstra a necessidade de melhoria da estabilidade dinâmica do fluido, tendo em vista sua aplicação em trocadores de calor. Por fim, as análises e resultados obtidos neste trabalho atingiram os objetivos propostos e podem subsidiar futuros estudos conduzidos na área de nanofluidos aplicados a trocadores de calor.

Palavras-chave: nanofluidos; óxido de grafeno; propriedades termofísicas; estabilidade.

ABSTRACT

Fluids are massively used as heat transfer media across many industries, including automotive, chemical, aeronautical and electronic, primarily through heat exchangers. The heat exchange efficiency is influenced by factors such as fluid properties, temperature, etc. Due to the low thermal conductivity of conventional fluids like water, there is a pressing need to explore more effective alternatives. This study proposes the synthesis and investigation of an aqueous graphene oxide suspension properties, focusing on specific mass, thermal conductivity and viscosity. The objective is to enhance the heat transfer efficiency of water, thereby improving the performance of heat exchangers. This initiative aligns with Sustainable Development Goal (SDG) No. 9, aiming to design more compact and efficient thermal systems while promoting resource conservation. The nanofluid was synthesized using the modified Hummers method, with prepared samples containing concentrations of 0.25% and 0.5% wt. Thermal conductivity was estimated from models available in the literature, while density was determined through precise weighing of the samples and established volume. Viscosity curve was plotted as a function of the fluid deformation rate, revealing pseudoplastic behavior across the evaluated range. Throughout a 60-day observation period, natural sedimentation occurred only after the 47th day, indicating a high level of stability. However, the low sedimentation velocity observed during centrifugation (less than 500 RPM) highlights the necessity to enhance the fluid's dynamic stability, given the application proposed in this study. The low sedimentation rate during centrifugation demonstrates the need to improve the dynamic stability of the fluid, considering its application in heat exchangers. Overall, the analyses and results of this study met the proposed objectives and can serve as foundation for future research in the field of nanofluids applied to heat exchangers.

Keywords: nanofluids; graphene oxide; thermophysical properties; stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 - Propriedades termofísicas de fluidos, metais e materiais carbonáceos a 25°C.	15
Tabela 2 - Massa específica e aumento de condutividade das amostras preparadas.	30
Quadro 1 - Resultados de artigos científicos sobre síntese de nanofluidos.	17
Figura 1 – Fluxograma das etapas do estudo.	25
Figura 2 - Síntese de solução de óxido de grafeno.	26
Figura 3 - Avaliação visual para amostra 2 (0,25% m/m) em: a) 0 dias; b) 1 dias; c) 4 dias; d) 5 dias; e) 6 dias; f) 7 dias; g) 11 dias; h) 12 dias; i) 15 dias; j) 19 dias; k) 40 dias; l) 47 dias; m) 54 dias; n) 60 dias.	34
Figura 4 - Avaliação visual para 0,5% m/m em: a) 0 dias; b) 1 dias; c) 4 dias; d) 5 dias; e) 6 dias; f) 7 dias; g) 11 dias; h) 12 dias; i) 15 dias; j) 19 dias; k) 40 dias; l) 47 dias; m) 54 dias; n) 60 dias.	34
Figura 5 - Sedimentação da amostra 2 observada para: a) 5000 RPM; b) 4000 RPM; c) 3000 RPM; d) 2000 RPM; e) 1000 RPM; f) 800 RPM; g) 500 RPM.	35
Figura 6 - Sedimentação da amostra 3 observada para: a) 5000 RPM; b) 4000 RPM; c) 3000 RPM; d) 2000 RPM; e) 1000 RPM; f) 800 RPM; g) 500 RPM.	36
Gráfico 1 – Número de publicações anuais com a palavra-chave “nanofluidos”.	16
Gráfico 2 - Curva log-log viscosidade aparente x taxa de deformação para a Amostra 3.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GO	Óxido de grafeno
h	horas
m/m	Concentração mássica
mL	Mililitros
n.º	Número
NFs	Nanofluidos
NPs	Nanopartículas
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RPM	Rotações por minuto
v/v	Concentração volumétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVAS	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	12
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 USO DE FLUIDOS PARA DISSIPÇÃO DO CALOR.....	14
2.2 NANOFLUIDOS	15
2.2.1 <i>Tipos de nanofluidos</i>	17
2.2.2 <i>Vantagens e desvantagens dos nanofluidos</i>	19
2.3 GRAFENO	20
2.4 SÍNTESE E ESTABILIDADE DE NANOFLUIDOS	21
2.4.1 <i>Método de um passo</i>	21
2.4.2 <i>Método de dois passos.....</i>	22
2.4.3 <i>Estabilidade de nanofluidos.....</i>	22
3 METODOLOGIA	24
3.1. Classificação da pesquisa.....	24
3.2. Etapas do estudo	24
3.2.1 <i>Síntese do nanofluido.....</i>	25
3.2.2 <i>Medição de propriedades termofísicas.....</i>	27
3.2.2.1. <i>Condutividade térmica</i>	28
3.2.2.2 <i>Viscosidade</i>	28
3.2.2.3. <i>Massa específica</i>	29
3.2.3. <i>Estabilidade/Sedimentação</i>	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Propriedades termo físicas do nanofluido.....	30
4.2. Estabilidade	33
5 CONCLUSÃO	37
5.1 CONTRIBUIÇÕES	38
5.2 LIMITAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS	38
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais formas de transferência de energia é o calor, crucial no controle e qualidade de processos e produtos em diversos ambientes industriais, como no campo da aeronáutica, automobilística, eletrônica, bioengenharia, indústria química e sistemas alternativos de geração de energia (Lomascolo *et al.*, 2015). Tendo em vista a alta demanda industrial, a convecção forçada de fluidos é uma das principais técnicas utilizadas para promover a transferência de calor através de dispositivos como radiadores, ventiladores, exaustores, chillers, etc. Tal técnica apresenta vantagens como a capacidade de absorver grandes quantidades de calor e transportá-lo através do escoamento, bem como a versatilidade de aplicações e condições na qual pode operar. Assim, o emprego de fluidos na transferência de calor tem contribuído para o desenvolvimento de dispositivos e sistemas mais compactos e eficientes (Bahiraei *et al.*, 2018).

Trocadores de calor são massivamente empregados para realizar trocas térmicas entre fluidos, com os objetivos de controlar a temperatura de processos, melhorar a performance e confiabilidade de equipamentos, diminuir a taxa de degradação de materiais e de custos de manutenção, prevenir falhas por fadiga térmica, aumentar a vida útil de componentes, prover segurança operacional, etc. (Fares; AL-Mayyahi; AL-Saad, 2020; Sundén; Fu, 2017). Por décadas, diferentes tecnologias vêm sendo estudadas e testadas para melhorar a eficiência energética e diminuir o tempo de troca térmica nesses dispositivos. Uma dessas técnicas é a suspensão de partículas nanométricas em fluidos de trabalho convencionais como água, óleos minerais e etilenoglicol (Bahiraei *et al.*, 2018). Tais materiais são denominados nanofluidos e tem como objetivo aumentar a condutividade térmica desses fluidos (que ainda é significativamente baixa) e, portanto, melhorar a transferência de calor. (Choi; Eastman, 1995).

Nanofluidos tem recebido atenção devido a menores riscos de aglomeração, (portanto menor possibilidade de obstrução de tubulações) além de áreas superficiais consideravelmente maiores para a troca de calor. O uso de nanofluidos (NFs) também contribui com a sustentabilidade, pois permite a construção de dispositivos mais compactos e eficientes, com menor demanda energética (Huq *et al.*, 2022). Sendo assim, a síntese e análise de fluidos com propriedades termofísicas superiores

representa uma oportunidade de pesquisa alinhada ao desenvolvimento de novos materiais para a construção de sistemas térmicos mais eficientes (Taha-Tijerina; Peña-Parás; Maldonado-Cortés, 2016).

1.1. JUSTIFICATIVAS

A busca por uma melhor gestão de recursos energéticos vem unindo as ciências térmicas e a nanotecnologia, abrindo caminho para a síntese de fluidos de transferência de calor mais eficientes do que fluidos convencionais como a água, óleos, entre outros. O avanço dos estudos nesse campo contribui na otimização de projetos de trocadores de calor, que engloba atividades de estudo, análise, pesquisa e projeto de sistemas térmicos, algumas das competências do engenheiro mecânico definidas pela Resolução N.º 218, artigo n.º 12, elaborada pelo Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA, 1973, p.4).

Projetos otimizados através do uso de NFs possibilitam a construção de trocadores de calor mais eficientes, proporcionando economia de material na fabricação desses dispositivos e diminuição de sua demanda energética, diferente de soluções como as aletas. Diante disso, os NFs representam como o investimento em ciência e pesquisa contribui na evolução da civilização rumo à sustentabilidade, metas estabelecidas pela ODS n.º 9, que trata do estímulo à ciência e inovação na indústria. A ODS também destaca o uso de materiais ecologicamente sustentáveis, o que justifica a busca científica por sínteses mais eficientes, alinhadas a esse objetivo.

Assim, uma variedade de materiais vem sendo utilizados na produção de NFs, como metais e óxidos metálicos. No entanto, a descoberta do grafeno em 2004 chamou bastante atenção por suas excelentes condutividades térmica e elétrica, baixíssima densidade, boas propriedades anticorrosivas e maiores áreas superficiais. Naturalmente, esses materiais tornaram-se grandes candidatos a novos fluidos de transferência de calor (Borode; Ahmed; Olubambi, 2019). Entretanto, apresentam desafios como o alto custo de produção desses fluidos, por exigir maiores graus de pureza dos reagentes, baixíssimas taxas de defeitos nos materiais e processos sofisticados (Bahiraei; Heshmatian, 2019; Khanafer; Vafai, 2018). Além disso, as clássicas rotas de oxidação do grafeno ainda utilizam reagentes bastante agressivos, como ácido sulfúrico e clorídrico, que são prejudiciais ao meio ambiente. Por isso, é

necessário ponderar se as melhorias nas propriedades termofísicas dos fluidos sintetizados são significativas em relação ao impacto ambiental gerado, discussão relevante do ponto de vista das ODS de forma geral.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Sintetizar e avaliar as propriedades termofísicas e estabilidade de um nanofluido de óxido de grafeno aquoso em temperatura ambiente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre a condutividade térmica do óxido de grafeno suspenso em água e comparar com os resultados obtidos nesse trabalho;
- Sintetizar suspensão de óxido de grafeno;
- Medir propriedades do nanofluido produzido como: densidade e viscosidade;
- Avaliar estabilidade e níveis de aglomeração do nanofluido produzido;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Nesse capítulo, foram apresentados a contextualização do tema, a motivação que levou a abordá-lo, o problema, desafios na implementação da abordagem proposta, os objetivos do presente trabalho e as justificativas.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica acerca de conceitos relevantes ao tema, detalhando como os fluidos são utilizados na dissipação térmica, o conceito de nanofluido, sua classificação, principais características, métodos de síntese e como o número de trabalhos publicados sobre o assunto vem crescendo, evidenciando sua relevância. Ao fim do capítulo, são apresentadas algumas características do grafeno e fatores que influenciam na estabilidade do fluido de forma geral.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada para a condução da pesquisa, com apresentação do fluxograma sequencial das etapas de pesquisa, do

método de síntese do nanofluido, equipamentos e equações utilizados para medição/estimativa das propriedades termofísicas do fluido. O capítulo 4 dedica-se aos resultados obtidos para o nanofluido produzido em relação a demais estudos. Por fim, o capítulo 5 foi dedicado à conclusão do trabalho, envolvendo os resultados encontrados no capítulo 4, limitações do estudo conduzido, contribuições e perspectivas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 USO DE FLUIDOS PARA DISSIPACÃO DO CALOR

A transferência de calor desempenha papel fundamental no controle e qualidade de processos e produtos industriais. Sua importância se reflete nas principais demandas da indústria, que incluem a melhoria da eficiência energética de processos, controle de temperatura associado à confiabilidade operacional de equipamentos, diminuição da taxa de degradação de materiais e de custos de manutenção, prevenção de falhas por fadiga térmica, aumento da vida útil de componentes, segurança operacional, etc. (Natesan; Karinka, 2023; Okonkwo *et al.*, 2021).

O calor pode ser transferido através de 3 mecanismos: condução, convecção e radiação. A convecção consiste na troca térmica entre superfícies (líquidas ou sólidas) e fluidos adjacentes em escoamento. Portanto, combina o mecanismo de condução com a movimentação dos fluidos, aumentando a taxa de transferência de calor. Assim, considerando a demanda industrial por processos cada vez mais rápidos, o mecanismo de convecção apresenta vantagens sobre os outros. Diversas técnicas são utilizadas com o objetivo de acelerar trocas térmicas, como a construção de aletas para expansão de áreas superficiais, uso de vibração sobre superfícies de transferência térmica e o escoamento forçado de fluidos. O uso de fluidos apresenta vantagem sobre as demais técnicas por transferir calor de forma mais rápida e por ser capazes de operar em distintos ambientes industriais, sem grandes prejuízos (Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij, 2020; Moran *et al.*, 2018).

Fluidos são massivamente empregados como meio de transferência de calor na indústria automobilística, bioengenharia, petroquímica, aeronáutica, eletrônica, além de sistemas alternativos de geração de energia, como células fotovoltaicas para energia solar e turbinas eólicas. A eficiência de troca térmica desse meio depende de diversos fatores: propriedades termo físicas do fluido, velocidade de escoamento, vazão, temperatura, condições de escoamento (interno ou externo), etc. (Çengel; Ghajar, 2020). Os fluidos de trabalho mais usados na indústria são, por exemplo, a água e o etilenoglicol, devido à sua baixa viscosidade, facilitando o seu escoamento em tubos e dutos. Porém, tem condutividades térmicas significativamente baixas

comparadas à condutividade térmica de materiais sólidos, como apresentado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Propriedades termofísicas de fluidos, metais e materiais carbonáceos a 25°C.

Material	Calor específico (J/kg.K)	Condutividade térmica (W/m.K)	Referência
Água	4180	0,6	Moran <i>et al.</i> (2018)
Óleo de motor	1881	0,14	Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij (2020)
Etilenoglicol	2400	0,25	Bergman; Lavine (2019)
Etanol	2840	0,16	Perry (2019)
Alumínio	903	237	Moran <i>et al.</i> (2018)
Cobre	385	401	Çengel; Ghajar (2020)
Ferro	447	80,2	Çengel; Ghajar (2020)
Ouro	129	317	Çengel; Ghajar (2020)
Prata	235	429	Çengel; Ghajar (2020)
Grafite	691	1950	Perry (2019)
Diamante	509	2300	Çengel; Ghajar (2020)
Nanotubos	370-400	1000 - 4500	Kumanek; Janas (2019)
De carbono			Maheswaran; Shanmugavel (2022)

Fonte: A autora, 2025.

A baixíssima condutividade térmica de fluidos convencionais limita seu uso e estimula a busca por fluidos de trabalho mais eficientes (Taha-Tijerina; Peña-Parás; Maldonado-Cortés, 2016). Segundo a Tabela 1, derivados de metais são bons candidatos para a melhoria de condutividade térmica. Materiais carbonáceos, no entanto, apresentam condutividades térmicas expressivamente superiores, maior biocompatibilidade, abundância na natureza e menores massas específicas (Ettefaghi *et al.*, 2017).

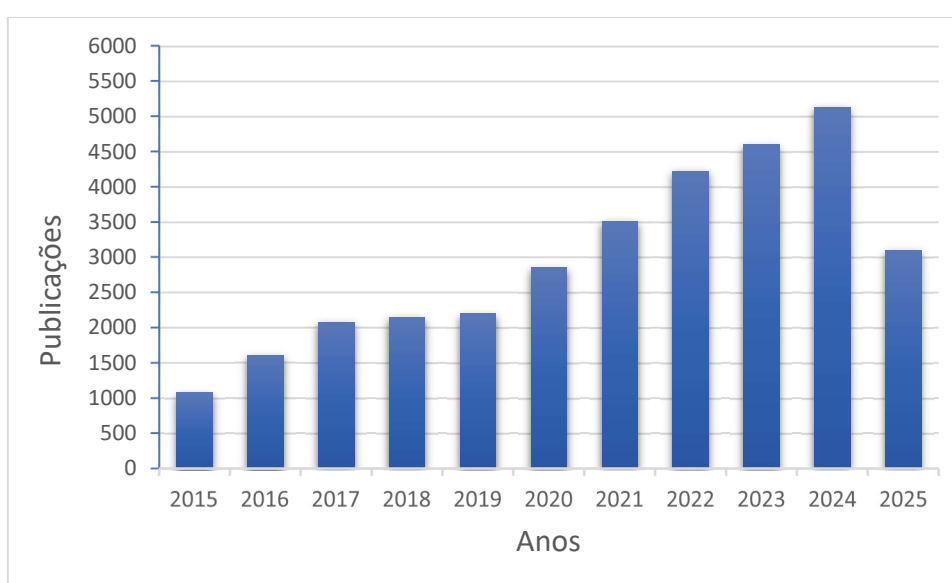
2.2 NANOFLUIDOS

A transferência de calor também pode ser melhorada através de ajustes nas propriedades dos fluidos, como a adição e dispersão de partículas sólidas, que podem contribuir no aumento de sua condutividade térmica. Partículas muito grandes, no

entanto, podem gerar incrustações e erosão em dutos, tornando-os mais susceptíveis a processos corrosivos, o que limita o uso de suspensões com partículas mili/micrométricas como novos fluidos de transferência de calor. À medida que a tecnologia se desenvolveu, foi possível obter partículas em escala nanométrica, que apresentaram grande potencial de melhorar as propriedades térmicas dos fluidos, sem causar os problemas citados anteriormente (Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij, 2020; Taha-Tijerina; Peña-Parás; Maldonado-Cortés, 2016).

Nesse contexto, surgiu o conceito de nanofluidos, que consistem em suspensões compostas por nanoestruturas (fibras, partículas, folhas, tubos, entre outros) menores do que 100 nanômetros, dispersas em fluidos base. Introduzidos em 1995, por Choi e Eastman, os NFs representam uma nova classe de materiais, com maiores áreas superficiais específicas, resultando em maior transferência térmica entre partículas e fluidos, melhor dispersão e estabilidade (Choi; Eastman, 1995; Esfahani; Languri, 2017). Diversos fatores influenciam na condutividade térmica dos NFs, como tamanho das partículas, forma, material, temperatura, concentração, acidez e efeitos de aglomeração (Lomascolo *et al.*, 2015). Sua versatilidade e capacidade de “customização” vem despertando o interesse da comunidade científica, como apresentado no Gráfico 1, que ilustra os resultados de busca para a palavra-chave “nanofluidos” na base de dados Science Direct, entre os anos de 2015 e 2025.

Gráfico 1 – Número de publicações anuais com a palavra-chave “nanofluidos”.



Fonte: A autora, 2025.

O aumento no número de publicações é decorrente da diversidade de tipos de nanopartículas, métodos de síntese de NFs, aparatos experimentais e condições de teste desses materiais existentes atualmente. Diversos artigos inclusos no levantamento não estudaram as nanopartículas, porém o tema foi citado por estar inserido no contexto das pesquisas realizadas, destacando sua atual relevância.

2.2.1 Tipos de nanofluidos

Nanofluidos podem ser categorizados de duas principais formas: quanto à diversidade ou à natureza das nanopartículas em suspensão. De acordo com a primeira classificação, NFs podem ser convencionais ou híbridos. Nanofluidos convencionais são suspensões compostas por um único tipo de nanopartícula, enquanto os híbridos possuem dois ou mais tipos. A segunda classifica os NFs em nanofluidos de partículas metálicas, óxidos metálicos, partículas cerâmicas, materiais carbonáceos etc. (Ali; Teixeira; Addali, 2018; Chamsa-ard *et al.*, 2017). Até o momento de escrita desse trabalho, não há classificação oficial de NFs em relação à quantidade de fluidos base utilizados na suspensão. O Quadro 1 apresenta resultados de diversas sínteses conduzidas em trabalhos científicos anteriores, os fluidos-base e nanopartículas utilizados e as melhorias obtidas nas amostras preparadas.

Quadro 1 - Resultados de artigos científicos sobre síntese de nanofluidos.

Autor	Fluidos-base	Partículas	Resultado
Shukla; Aiyer (2015)	Óleo naftênico	Nanodiamantes	14,5% de aumento na condutividade térmica
Sözen; Khanları; Çiftçi (2019)	Água	NPs de argila Kaolin	13,3% de aumento na condutividade térmica
Elsaid (2019)	Água e etilenoglicol	NPs de Co_3O_4	31,8% de aumento no número de Nusselt
Subramanian <i>et al.</i> (2019)	Água	NPs de TiO_2	25% de aumento na taxa de transferência de calor
Erdoğan <i>et al.</i> (2021)	Água e etilenoglicol	NPs de Al_2O_3	9,5% de aumento na taxa de transferência de calor

Dayou; Ting; Vigolo (2022)	Água	MWCNT (Nano tubos de carbono de múltiplas paredes)	Máximo aumento de 14,4% no coeficiente de transferência de calor global
Dayou; Ting; Vigolo (2022)	Água	Nanoplaquetas de grafeno	Máximo aumento de 26,1% no coeficiente de transferência de calor global

Fonte: A autora, 2025.

Shukla e Aiyer (2015) sintetizaram e caracterizaram NFs compostos de nanodiamantes e óleo naftênico, comumente utilizado em transformadores. A resistência elétrica e viscosidade do fluido base foram mantidas, devido aos baixíssimos teores de nanopartículas, em torno de 0,12% em massa. Houve aumento de 14,5% na condutividade térmica a 40°C. Sözen, Khanları e Çiftçi (2019) investigaram o efeito de nanopartículas de argila Kaolin em água. As partículas de argila foram moídas e dispersas em água, com concentração de 2% em massa. O surfactante Triton X-100 foi adicionado à mistura para diminuir efeitos de precipitação e aglomeração. Foram observados aumentos médios no coeficiente global de transferência de calor, condutividade térmica e coeficiente de convecção de 9,3%, 13,3% e 12%, respectivamente. Os testes foram executados em um trocador de placas compacto, onde foram utilizadas diferentes vazões e temperaturas para comparação dos dados.

Subramanian *et al.* (2019) avaliou a capacidade de transferência térmica de NFs aquosos com nanopartículas de dióxido de titânio nos regimes laminar, transitório e turbulento. As amostras foram preparadas a concentrações em volume de 0,1, 0,3 e 0,5% e apresentaram trocas térmicas maiores do que o fluido base. O aumento máximo na taxa de transferência de calor foi de 25%, a 0,5% v/v. Erdoğan *et al.* (2021) comparou a performance térmica de um nanofluido composto por partículas de Al_2O_3 , etilenoglicol e água com o desempenho de uma mistura 50:50 etilenoglicol-água, fluido amplamente utilizado em radiadores automotivos. O nanofluido foi testado sob diferentes condições para análises mais representativas e apresentou aumento na taxa de transferência térmica de 9,5% e diminuiu as perdas energéticas em 68%. Dayou, Ting e Vigolo (2022) realizou estudos com 2 tipos de materiais carbonáceos:

Nanoplaquetas de grafeno e nanotubos de carbono. Os nanomateriais foram dispersos em água a concentrações volumétricas de 0,1 a 0,35% v/v. O aparato experimental utilizado foi um trocador de calor compacto de tubo concêntrico com diferentes configurações geométricas, sendo observados aumentos máximos de coeficiente de transferência de calor globais de 26,1% para o nanofluido de GnP e 14,4% para os nanotubos. A comparação entre os estudos apresentados demonstra que materiais carbonáceos apresentam uma melhor relação entre concentração e desempenho térmico, visto que percentuais de aumento de transferência de calor semelhantes foram atingidos a concentrações menores do que nos outros estudos.

2.2.2 Vantagens e desvantagens dos nanofluidos

Quando comparado com soluções/suspensões aquosas ou sólido-líquido convencionais, os nanofluidos apresentam uma série de vantagens, a maioria decorrente do tamanho das partículas em suspensão. Nanomateriais, de maneira geral, possuem áreas superficiais por volume superiores a micropartículas, que resulta em maior interação entre fluido e NPs, melhorando a transferência de calor. Sua capacidade de customização para diferentes aplicações e a existência de diversos tratamentos para melhorar a estabilidade do fluido, como técnicas ultrassônicas e modificação de superfícies a nível molecular também são fatores que favorecem os NFs (Younes *et al.*, 2022). Sua principal vantagem é a maior taxa de transferência de calor proporcionada, devido ao aumento de sua condutividade térmica em relação a fluidos convencionais, reduzindo o tamanho de sistemas térmicos (Mahian *et al.*, 2019). O custo operacional desses equipamentos também diminui, pois, a vazão mássica de fluido necessária para manter as taxas de transferência de calor é menor, decorrente da melhoria em suas propriedades (Paolucci; Puliti, 2015).

Porém, apesar de suas propriedades superiores, existe um custo associado à síntese e ao uso de NFs. Seu custo de performance deve ser menor do que a economia gerada por seu uso, ou seja, a condutividade térmica precisa manter-se superior por um bom período para que sua aplicação na indústria seja viável. Em geral, a condutividade térmica está associada à estabilidade dos fluidos, que tende a aumentar quanto menor for a partícula. Entretanto, a síntese de partículas cada vez menores aumenta consideravelmente os custos de produção, dificultando a

implementação desses fluidos em larga escala (Chakraborty; Panigrahi, 2020). As divergências entre literaturas, comportamentos peculiares das nanopartículas e a falta de conhecimento que explique satisfatoriamente o porquê ocorrem as modificações de propriedades também são fatores que dificultam a aplicabilidade industrial dos NFs (Sidik *et al.*, 2014). A interação química entre equipamentos e NFs ainda não foi profundamente analisada a longo prazo e, por isso, os riscos de erosão e corrosão podem ser aumentados (Mahian *et al.*, 2019). Fatores como características físico-químicas das nanopartículas, concentração e rotas de síntese utilizadas influenciam consideravelmente nos impactos ambientais que podem causar, pois nanopartículas possuem alta atividade superficial, podem ter caráter inflamatório, carcinogênico e alérgico e comprometer os sistemas imunológico, nervoso, reprodutivo etc. (Elsaid *et al.*, 2021).

2.3 GRAFENO

Grafeno é a denominação de uma camada de espessura atômica de átomos de carbono dispostos hexagonalmente, cujo padrão é a estrutura básica que compõe demais materiais carbonáceos como grafite, nanotubos de carbono, fulerenos, entre outros. (Novoselov *et al.*, 2004). Desde sua descoberta em 2004, vem atraindo bastante atenção por suas características distintas como: alta condutividade térmica, podendo atingir valores entre 3000 – 5000 W/m.K (Balandin *et al.*, 2008), baixa densidade, excelentes propriedades elétricas, óticas e mecânicas (Parviz *et al.*, 2016).

O uso de nanopartículas a base de grafeno apresenta diversas vantagens sobre outros tipos de materiais como, por exemplo, maior área superficial, condutividade térmica superior, menor grau de erosão e menor possibilidade de corrosão, devido ao caráter anticorrosivo do grafeno (Sadeghinezhad *et al.*, 2016). No entanto, o uso de grafeno ainda enfrenta desafios como a dificuldade de produzir folhas de alta qualidade em larga escala e garantir uma boa dispersão em suspensões aquosas, devido à sua hidrofobicidade (Papageorgiou; Kinloch; Young, 2017). Além disso, sua produção ainda é de alto custo, motivando pesquisadores a obter derivados mais economicamente acessíveis e com propriedades semelhantes. O óxido de grafeno torna-se um derivado interessante para a preparação de NFs aquosos e pode ser obtido através de diversos métodos, como o de Hummers, Brodei ou

Staudenmaier. Sua maior afinidade com a água deve-se à introdução de grupos hidrofílicos no processo de oxidação do grafeno, que o tornam estável sem a adição de estabilizadores (Bahiraei; Heshmatian, 2019). Apesar de sua melhor dispersão em água, a presença de oxigênio reduz drasticamente a condutividade térmica do óxido de grafeno em relação ao grafeno puro (Mu *et al.*, 2014) e, por isso, é preciso ter cautela com os métodos de síntese adotados.

2.4 SÍNTESE E ESTABILIDADE DE NANOFLUIDOS

Os métodos de síntese de nanofluidos influenciam significativamente seu comportamento macroscópico e impactam em características como estabilidade, homogeneidade e composição química (Devendiran; Amirtham, 2016). A escolha da rota de síntese empregada deve levar em conta a aplicação do nanofluido, as interações físico-químicas entre partículas e fluido, além da escala de produção do material (Taha-Tijerina; Peña-Parás; Maldonado-Cortés, 2016). Atualmente, são utilizados dois tipos de síntese para a produção de NFs: o método de um passo e o de dois passos.

2.4.1. Método de um passo

O método de um passo caracteriza-se pela síntese e dispersão das nanopartículas no fluido base em um único passo. Em geral, fluidos sintetizados por esse método tendem a ser mais estáveis e se degradam mais lentamente, visto que as partículas são produzidas e armazenadas no próprio fluido, por isso sofrem menos oxidação do ambiente (Ali *et al.*, 2021). Nesse método, podem ser utilizadas duas abordagens: química e física (Alktranee; Bencs, 2023).

As principais vantagens desse método são a melhor estabilidade dos fluidos sintetizados, devido à baixa aglomeração das partículas, ausência de aditivos estabilizadores e maior controle sobre o tamanho e forma das partículas, a depender da abordagem utilizada (Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij, 2020). No entanto, uma de suas principais desvantagens é o alto custo de síntese, devido à complexidade dos processos, o que dificulta a produção em larga escala (Babita; Sharma; Gupta, 2016). Do ponto de vista químico, a presença de resíduos de reações químicas internas compromete a pureza do nanofluido e pode interferir em suas propriedades finais (Jama *et al.*, 2016).

2.4.2. Método de dois passos

Na síntese em dois passos, as nanopartículas são produzidas separadamente e depois são dispersas no fluido base (Bahiraei; Heshmatian, 2019). Em geral, para a dispersão das partículas, são utilizadas técnicas como a agitação magnética, banhos ultrassônicos, entre outras técnicas de homogeneização. Esse método é mais utilizado devido à grande disponibilidade comercial de partículas em forma de pó e por sua simplicidade em relação ao método de um passo (Ali; Teixeira; Addali, 2018).

Esse método é capaz de produzir NFs em larga escala, por ser mais facilmente implementado e ter menor custo em relação ao anterior, o que é interessante do ponto de vista industrial/comercial (Chakraborty; Panigrahi, 2020). Além disso, o método é bastante flexível e pode ser utilizado para sintetizar quase todos os tipos de fluidos (Babita; Sharma; Gupta, 2016). No entanto, sua principal desvantagem são as maiores tendências à aglomeração de partículas no processo de secagem e a alta energia superficial dos pós, que diminui sua molhabilidade e, conseqüentemente, dificulta a dispersão das NPs nos fluidos base (Ali *et al.*, 2021).

2.4.3. Estabilidade de nanofluidos

A estabilidade dos nanofluidos representa sua capacidade de preservar suas propriedades e manter seu desempenho sem que haja aglomeração de partículas. Esses materiais comportam-se de maneira particular pela manifestação de fenômenos físicos, mecânicos, óticos, entre outros, únicos e imprevisíveis, decorrentes da manipulação da matéria em escala nanométrica e, por isso, são ainda mais desafiadores (Taha-Tijerina; Peña-Parás; Maldonado-Cortés, 2016). Esses fenômenos, em conjunto com as características das nanopartículas e rotas de síntese adotadas, impactam significativamente na estabilidade do fluido. Alguns desses fatores são: a concentração das partículas, o fluido base, morfologia e tamanho das partículas, temperatura do ambiente, etc (Wang *et al.*, 2023).

Nanopartículas, quando em suspensão, estão submetidas a diversas forças a nível molecular: forças gravitacionais, de empuxo, eletrostáticas, forças de Van der Waals (forças de atração ou repulsão entre as moléculas), entre outras (Said *et al.*, 2022). Segundo a teoria DLVO, publicada em 1955, a estabilidade de uma suspensão coloidal é o resultado do balanço das forças de Van der Waals das partículas e das forças eletrostáticas, resultantes da interação fluido-partícula. Quando as forças

eletrostáticas prevalecem sobre as forças de Van der Waals repulsivas, as colisões intermoleculares tendem a cessar e as partículas dispersam-se melhor na suspensão, tornando o nanofluido mais estável. Caso contrário, as partículas tendem a aglomerar no fluido base (Derjaguin; Landau, 1944; Verwey; Overbeek, 1955). A intensidade dessas forças depende diretamente de características como o diâmetro das NPs, distância entre partículas, morfologia e concentração, bem como a temperatura do fluido (Gregory, 1981; Zareei; Yoozbashizadeh; Madaah Hosseini, 2018). De maneira macroscópica, os efeitos de aglomeração e sedimentação de partículas em fluidos podem impactar negativamente nas propriedades térmicas do fluido sintetizado e causar problemas como abrasão, corrosão e obstrução de trocadores de calor e de dispositivos eletrônicos (Chamsa-ard *et al.*, 2017). Por isso, a análise de estabilidade é essencial, tanto para pesquisadores como para engenheiros que buscam a aplicação de NFs em larga escala (Alktranee; Bencs, 2023).

3 METODOLOGIA

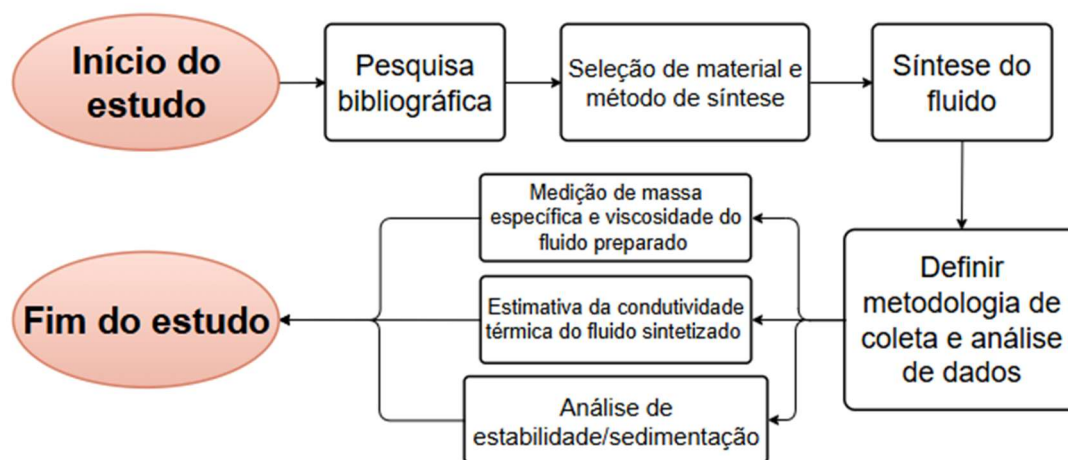
3.1. Classificação da pesquisa

O presente trabalho pode ser definido como uma pesquisa descritiva, pois tem como objetivo descrever as características do nanofluido produzido. Quanto à abordagem, classifica-se como uma pesquisa qualiquantitativa, visto que os dados das propriedades termofísicas do nanofluido foram coletados e interpretados de modo a avaliar a possibilidade do nanofluido ser utilizado como fluido de transferência de calor. Em relação ao método, configura-se como uma pesquisa experimental, visto que foi estudado o efeito de diferentes concentrações de nanofluido sobre suas propriedades (Gil, 2017; Neto; Scarminio; Bruns, 2010).

3.2. Etapas do estudo

A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas de estudo para o presente trabalho. Inicialmente, foi realizada pesquisa bibliográfica em bases de dados científicas e literatura especializada para selecionar o material a ser sintetizado, bem como a rota de síntese mais adequada à aplicação do material proposta nesse trabalho. A síntese foi realizada no laboratório de pesquisa Mesomag, integrante do Departamento de Física da UFPE. Para esse trabalho, investigar as propriedades termofísicas dos NFs representa uma alternativa promissora na otimização de sistemas térmicos e, por isso, foram avaliadas, de forma experimental, a massa específica e a viscosidade.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do estudo.



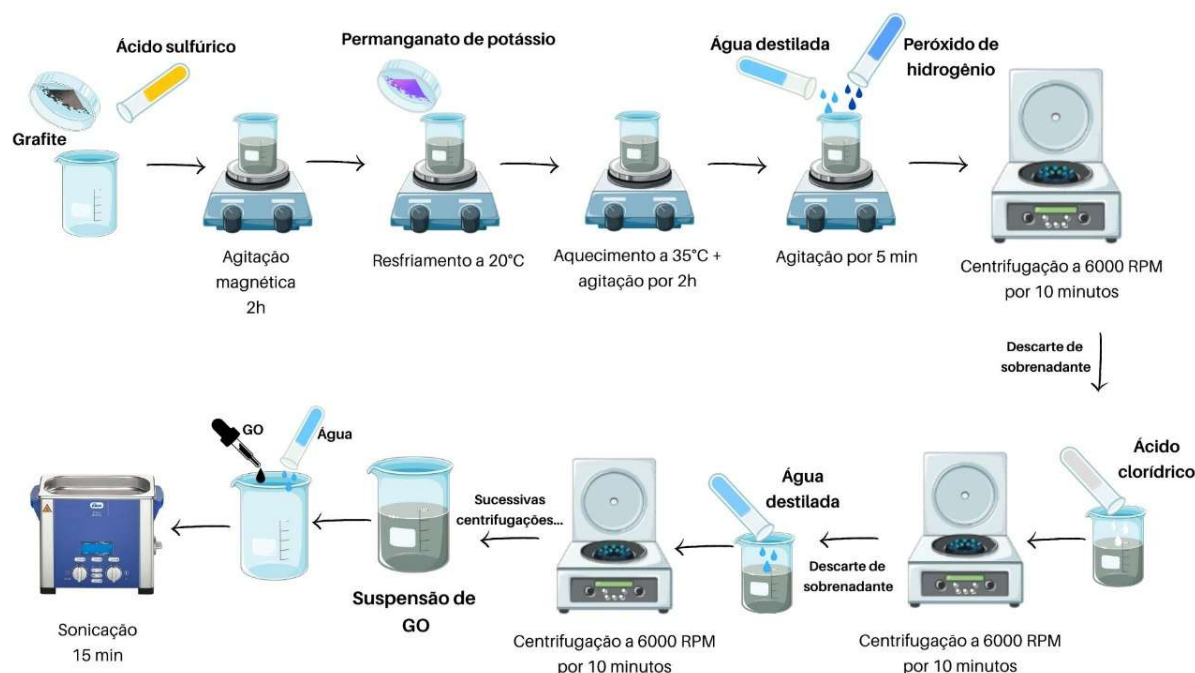
Fonte: A autora, 2025.

A condutividade térmica, no entanto, foi encontrada através de revisão bibliográfica. Foram preparadas amostras a diferentes concentrações, com o objetivo de avaliar seus efeitos sobre as propriedades termofísicas e selecionar os equipamentos/instrumentos disponíveis e adequados para mensurar tais propriedades.

3.2.1. Síntese do nanofluido

O óxido de grafeno (GO) foi sintetizado a partir do método de Hummers adaptado (Hummers; Offeman, 1958) usando os seguintes reagentes: ácido sulfúrico (H_2SO_4), grafite em pó, permanganato de Potássio (KMnO_4), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ácido clorídrico (HCl) e água destilada. A Figura 2 apresenta a rota de síntese utilizada para obter a suspensão de GO e suas respectivas diluições.

Figura 2 - Síntese de solução de óxido de grafeno.



Fonte: A autora, 2025.

Assim, 22,5 mL de ácido sulfúrico e 1 g de grafite em pó foram misturados por agitação magnética (stirring) por 2h. Ainda sob agitação, a suspensão foi resfriada a 20 °C e, em sequência, 3 gramas de permanganato de potássio foram adicionadas gradativamente. Após a dissolução do permanganato, a suspensão foi aquecida a 35 °C e se manteve em agitação por mais 2 h. Posteriormente, a velocidade de agitação foi elevada e foram adicionados 45 mL de água destilada. Houve aumento de temperatura no meio reacional, devido a reações exotérmicas com a água. Em seguida, ainda sob agitação, foram adicionados 5 mL de peróxido de hidrogênio, a uma concentração de 30%. Por fim, foram adicionados 75 mL de água destilada para diluição, com a suspensão sob agitação por mais 5 min para dispersão do material. A suspensão preparada foi transferida para tubos de centrifugação de 50 mL do tipo Falcon e centrifugada a 6000 RPM por 10 minutos. O sobrenadante gerado foi descartado, foram adicionados 20 mL de solução HCl (concentração de 5%) em cada tubo para, então, serem centrifugados novamente, sob as condições previamente descritas (Krishnamoorthy *et al.*, 2013).

O sobrenadante foi novamente descartado e água destilada foi adicionada em cada um dos tubos, até completar aproximadamente 40 mL, e serem centrifugados

mais uma vez. Esse processo foi repetido até que o sobrenadante atingisse valores de pH semelhantes ao da água destilada utilizada, em torno de 5. A medição do pH foi realizada utilizando fitas de pH (Carvalho, 2021). A suspensão original foi reservada e, posteriormente, foram realizadas diluições para concentrações em massa de 0%, 0,25%, 0,5% de GO em água, denominadas Amostra 1, 2 e 3, respectivamente. Sabendo que as nanopartículas tem o propósito de melhorar a condutividade térmica de fluidos sem prejudicar significativamente propriedades como densidade e viscosidade, os baixos percentuais em massa utilizados nesse trabalho estão concordantes com o objetivo desse tipo de material. As concentrações adotadas foram maiores do que o encontrado em revisão bibliográfica para que as modificações de propriedade pudessem ser detectadas pelos equipamentos. As diluições possuíam volume final de 20 mL e foram colocadas em banho ultrassônico por 15 minutos a uma frequência de 37 kHz, com o objetivo de melhorar a dispersão das partículas em água.

Para a dispersão das NPs de GO em água, foi utilizado o lavador ultrassônico, da marca Elmasonic, modelo P30H, que opera com tensão de alimentação dupla (115-120 V ou 220-240 V) e oferece duas frequências ultrassônicas (37 kHz e 80 kHz). Possui consumo total de 370 W (37 kHz) ou 350 W (80 kHz), com potência ultrassônica efetiva de 120 W (37 kHz) ou 100 W (80 kHz) e pico de potência de até 480 W (37 kHz) ou 40 W (80 kHz). Sua capacidade máxima é de 2,75 litros, com um cesto interno para acomodação de peças. O equipamento inclui dreno de 3/8" e é construído em aço inoxidável V2A, garantindo resistência e durabilidade.

3.2.2. Medição de propriedades termofísicas

Como descrito na seção 1.1, é esperado que, à medida em que a concentração de NPs aumente, o nanofluido produzido possua propriedades termofísicas superiores ao fluido base (Gupta *et al.*, 2017) e promova melhores trocas térmicas em trocadores de calor. No entanto, propriedades como massa específica e viscosidade também impactam no custo operacional e durabilidade desses equipamentos e, por isso, também foram avaliados no presente trabalho. Outras características avaliadas foram o nível de dispersão das partículas e sua estabilidade no fluido base.

3.2.2.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica foi estimada a partir da correlação proposta por Yang (2019), apresentada na Equação 1.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0,998 + 0,023 \times T^{0,669} \times wt^{0,678} \quad (1)$$

onde k_{nf} e k_{bf} são as condutividades térmicas do nanofluido e do fluido base, respectivamente, T é a temperatura da amostra em °C e wt é a concentração em massa das nanopartículas de óxido de grafeno, tratada nesse trabalho como m/m. O modelo é válido para suspensões de óxido de grafeno analisadas em temperaturas entre 20 e 60°C e concentrações em massa entre 0,05 e 1,5%. Seu percentual de erro máximo em relação aos resultados experimentais obtidos no artigo é de 2,1% (Yang *et al.*, 2019).

3.2.2.2 Viscosidade

A viscosidade de um fluido é uma das propriedades mais importantes no projeto de trocadores de calor, pois está relacionada com o regime de escoamento do fluido e as perdas de carga ao longo do equipamento, que impactam em seu consumo energético. Fluidos mais viscosos possuem maior resistência ao escoamento e diminuem parâmetros como o número de Reynolds, gerando escoamentos laminares com transferência térmica mais lenta e maior consumo energético, característica indesejada ao fluido. A curva de viscosidade foi plotada em função da taxa de deformação, pois a natureza das amostras era desconhecida. Por isso, tendo em vista o caráter investigativo proposto pelo presente trabalho, obter uma curva de viscosidade em função da deformação consistiu em um estudo mais adequado aos objetivos estabelecidos anteriormente.

A análise de viscosidade do nanofluido foi conduzida a 25°C, através de um reômetro compacto modular da marca Anton Paar, modelo MCR 102, com capacidade de medir torques desde 5 nNm (em rotação ou oscilação) até 200 mNm. Opera em velocidades angulares de 0 a 314 rad/s (equivalente a 3000 RPM) e frequências de

até 100 Hz, com medição de força normal em uma faixa de -50 a 50 N e motor eletronicamente comutado.

3.2.2.3. Massa específica

Para determinar a massa específica, foram utilizados 4 tubos Falcon de 50 mL (um vazio e 3 com as amostras) e uma balança analítica, com resolução de 4 casas decimais. Os tubos com as amostras foram pesados 5 vezes para obter a média e, assim, encontrar a massa da amostra através da diferença entre os valores. O valor da densidade foi obtido através da Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

onde m é a massa da amostra preparada e V é o volume total da suspensão.

3.2.3. Estabilidade/Sedimentação

A estabilidade do nanofluido foi avaliada via método fotográfico, isto é, ao longo do tempo de estudo, foram captadas imagens da suspensão sintetizada em um recipiente transparente. Em estudos mais curtos, o método de centrifugação torna-se essencial na compreensão do comportamento de suspensões coloidais, pois acelera a sedimentação de suspensões através da aplicação de força centrífuga. A centrifugação é essencial na análise da estabilidade dinâmica do nanofluido, cuja aplicação almejada, nesse trabalho, está em microtrocaadores de calor. As centrifugações foram conduzidas de forma complementar à análise estática, com velocidades variando de 5000 a 500 RPM por 5 min cada.

O equipamento utilizado nessa análise foi a centrífuga digital CD-20000, fabricada pela Anco/IONLAB, com faixa de velocidade ajustável de 300 a 20.000 RPM, com resolução de 50 rpm, força relativa centrífuga (RCF) de 20 a 4.650 xg e tensão de alimentação de 220 V. Sua precisão no controle de velocidade é de ± 20 RPM e tempo ajustável de 0,1 a 99 minutos, em incrementos de 1 minuto ou 1 segundo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades termo físicas do nanofluido

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a massa específica e aumento percentual de condutividade das amostras a 25°C. Conhecido o volume das amostras, sua massa específica foi calculada através da pesagem das amostras e aplicação da Equação 2. No entanto, as amostras apresentaram comportamento peculiar, devido à redução de massa específica com o aumento de concentração mássica. No presente trabalho, as diminuições percentuais de massa específica para as amostras 2 e 3 foram de, respectivamente, 0,15% e 3,79%. Tal comportamento pode ser justificado devido a menor massa específica do óxido de grafeno, quando bem disperso em água (Liu *et al.*, 2014).

Tabela 2 - Massa específica e aumento de condutividade das amostras preparadas.

Propriedades	0% GO	0,25% GO	0,5 % GO
Massa específica (g/cm ³)	0,996	0,994	0,958
Aumento percentual de condutividade térmica a 25°C	0%	7,3%	11,8%

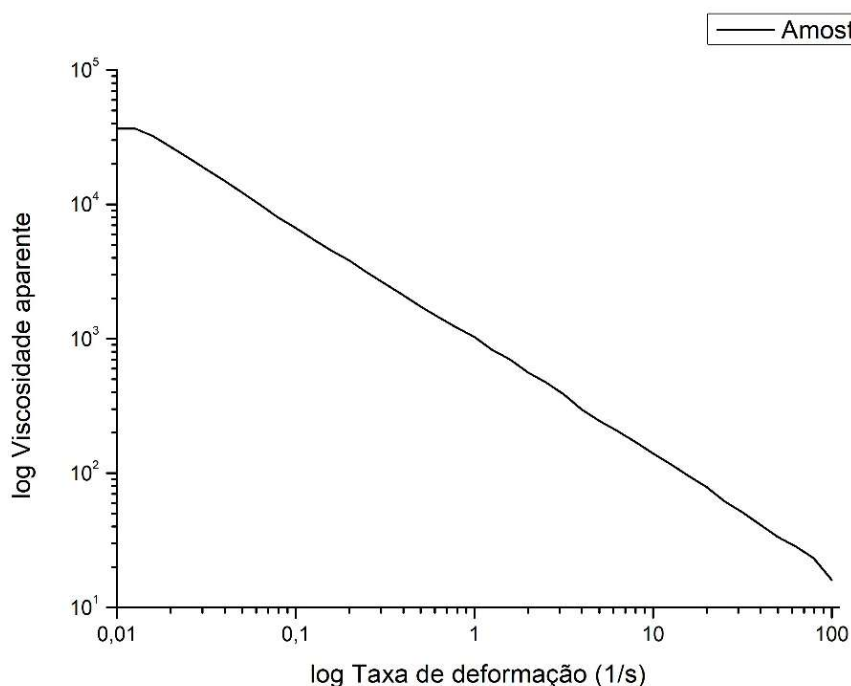
Fonte: A autora, 2025.

O mesmo comportamento também foi observado por Vincely e Natarajan, em amostras de concentração mássica 0,005%, 0,01% e 0,02%, com diminuições percentuais de 9,6%, 11,2% e 11,8%, respectivamente. Em um estudo conduzido por Ijam *et al.* (2015), NFs de óxido de grafeno com 0,05% m/m, 0,07% m/m e 0,1% m/m apresentaram reduções percentuais de massa específica ainda maiores em relação à sua concentração mássica, em torno de 0,4%, 0,6% e 0,7%, respectivamente. As reduções de massa específica observadas neste trabalho, em comparação com os dados da literatura, apresentam magnitudes inferiores, decorrentes das discrepâncias nas rotas de síntese entre os estudos. Apesar disso, o comportamento peculiar é benéfico à operação de trocadores de calor, visto que fluidos menos densos reduzem o consumo energético de sistemas de bombeamento anexos a esses equipamentos, atingem velocidades de escoamento mais altas e reduzem o risco de incrustações, o

que contribui para maiores taxas de transferência de calor (Kakaç; Liu; Pramuanjaroenkij, 2020).

Do ponto de vista reológico, segundo o gráfico 2, as amostras apresentaram comportamento não Newtoniano pseudoplástico em todo o intervalo avaliado. Esse efeito, denominado shear-thinning (afinamento por cisalhamento ou efeito pseudoplástico), ocorre em fluidos cujas moléculas ou partículas, devido a uma determinada tensão de cisalhamento, reorganizam-se de forma a diminuir sua resistência ao fluxo (Fox; McDonald; Pritchard, 2018). Como esperado, o nanofluido apresenta valores de viscosidade significativamente superiores aos da água. Apesar disso, o trecho final da curva indica uma tendência decrescente na viscosidade para maiores deformações, isto é, quanto mais o fluido for deformado, menor será sua viscosidade. Em nanofluidos a base de grafeno, esse efeito é acentuado com o aumento na concentração de partículas, devido às interações mais fortes entre as folhas do material. À medida que a taxa de cisalhamento aumenta, as folhas separam-se e alinham-se na direção do escoamento, provocando a redução na viscosidade aparente (Hadadian; Goharshadi; Youssefi, 2014). A alta resistência mecânica, herdada do grafeno, confere maior resistência ao cisalhamento ao nanofluido e, por isso, os valores de viscosidade encontrados foram consideravelmente altos.

Gráfico 2 - Curva log-log viscosidade aparente x taxa de deformação para a Amostra 3.



Fonte: A autora, 2025.

A viscosidade de nanofluidos de óxido de grafeno também diminui com o aumento de temperatura, devido ao maior grau de agitação das partículas (movimento Browniano). O enfraquecimento das ligações intermoleculares diminui a coesão molecular e, conseqüentemente, a resistência ao escoamento (Malkin; Isayev, 2022). A significativa redução na viscosidade dinâmica traz vantagens como a redução do consumo energético de sistemas de bombeamento, escoamentos turbulentos e diminuição nas taxas de incrustações ao longo das superfícies de troca térmica (Çengel; Cimbala, 2024).

Para esse trabalho, a condutividade térmica foi estimada a partir de modelos propostos previamente em literatura e revisão bibliográfica. Utilizando o modelo de Yang et al. (2019), apresentado na seção 3.2.2.1, os aumentos percentuais referentes às amostras 2 e 3 são de 7,5% e 12,2%, para uma temperatura de 25°C. O modelo proposto por Liu et al. (2019) estima as melhorias na condutividade térmica de acordo com a concentração de material na base massa/volume e corrobora com o primeiro modelo, com aumentos percentuais de 7,4% e 14,6% para as amostras 2 e 3, respectivamente. Em estudo conduzido por Esfahani e Languri (2017), o aumento de

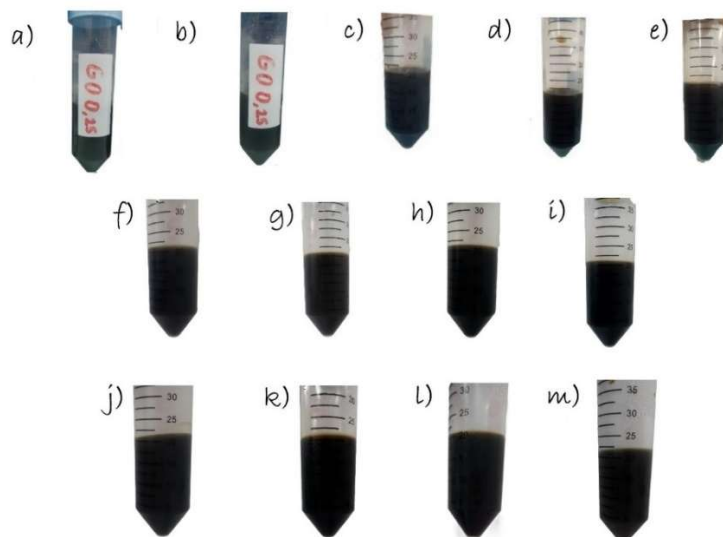
condutividade térmica, para 0,1% m/m a 40°C, foi de 18,9%, ligeiramente superior aos dois primeiros modelos. Isso é decorrente da elevação de temperatura, que aumenta as colisões entre as partículas, associadas ao movimento Browniano (Al-Waeli *et al.*, 2017). Assim, a contribuição da microconvecção das partículas é ainda maior e, por isso, a aplicação de nanofluidos em microtrocares de calor torna-se interessante (Mahbubul, 2019).

Sadeghinezhad *et al.* (2015) relataram aumentos de condutividade térmica em torno de 21%, para 0,1% m/m a 25°C. O fluido permaneceu estável por 30 dias e apresentou 14% de sedimentação ao fim do estudo, devido à ausência de grupos oxigenados hidrofílicos nas folhas de grafeno. Hajjar, Rashidi e Ghazatloo (2014) reportaram um aumento de 33,9% na condutividade térmica da água, a 20°C e 0,25% m/m. Para uma temperatura de 40°C, o aumento foi de 47,54%, consideravelmente superior aos estudos anteriormente citados. Os autores do artigo realizaram pequenas modificações na síntese conduzida no presente trabalho, como o acréscimo de ácido nítrico e nitrato de sódio, e obtiveram impactos significativos no fluido final. As divergências nos resultados indicam a influência de fatores como o tamanho das partículas, tempo e frequência de sonicação (Gao *et al.*, 2018), nível de oxidação do grafeno (Mu *et al.*, 2014) e métodos de síntese nas propriedades termofísicas finais do material sintetizado.

4.2. Estabilidade

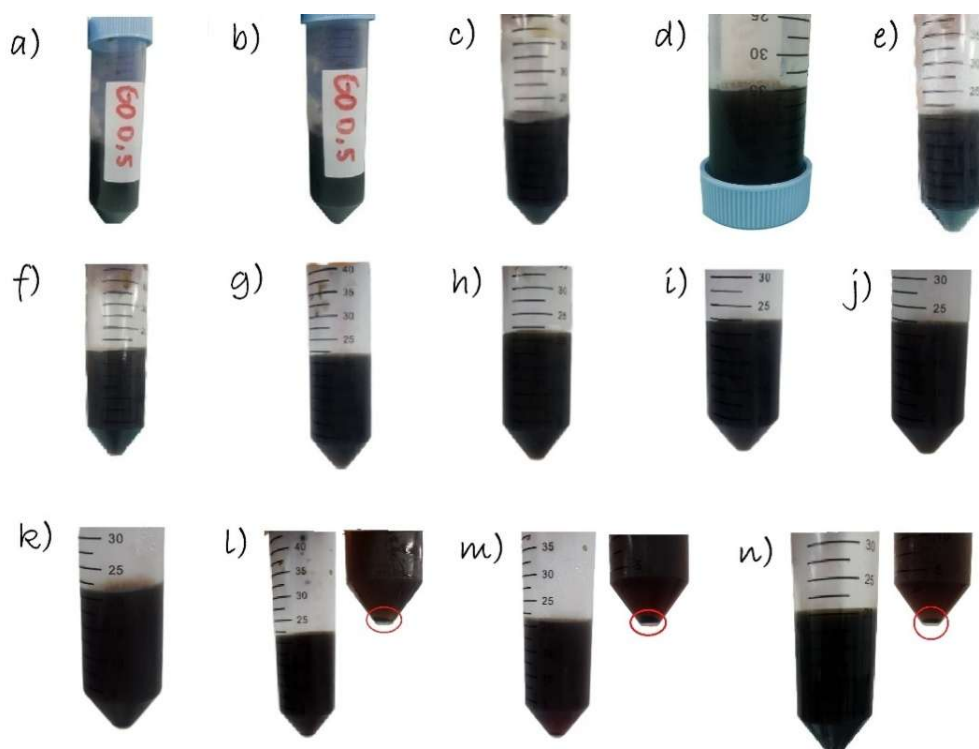
Com base na seção 2.3, nanofluidos a base de grafeno apresentam maior estabilidade comparado a outros materiais. O processo de oxidação do grafite, descrito na seção 3.2.1., melhora a dispersão das folhas de grafeno em água e, por isso, é esperado que um nanofluido composto de óxido de grafeno seja mais estável em meio aquoso. As amostras 2 e 3 foram observadas e fotografadas por um período de 60 dias, como apresentado nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 - Avaliação visual para amostra 2 (0,25% m/m) em: a) 0 dias; b) 1 dias; c) 4 dias; d) 5 dias; e) 6 dias; f) 7 dias; g) 11 dias; h) 12 dias; i) 15 dias; j) 19 dias; k) 40 dias; l) 47 dias; m) 54 dias; n) 60 dias.



Fonte: A autora, 2025.

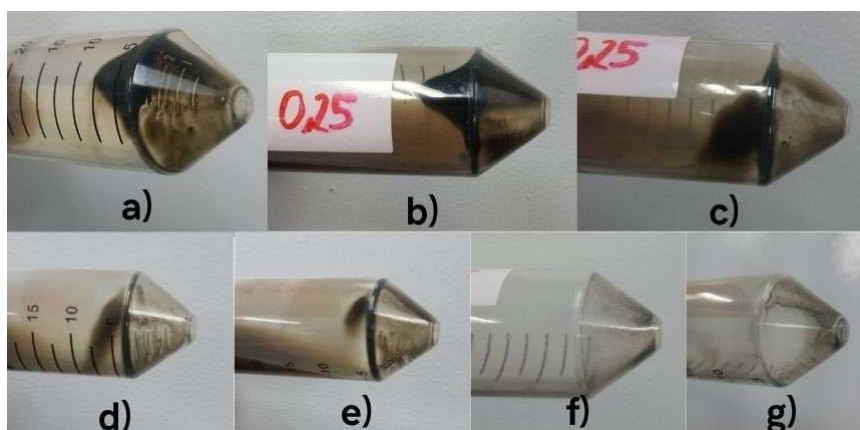
Figura 4 - Avaliação visual para 0,5% m/m em: a) 0 dias; b) 1 dias; c) 4 dias; d) 5 dias; e) 6 dias; f) 7 dias; g) 11 dias; h) 12 dias; i) 15 dias; j) 19 dias; k) 40 dias; l) 47 dias; m) 54 dias; n) 60 dias.



Fonte: A autora, 2025.

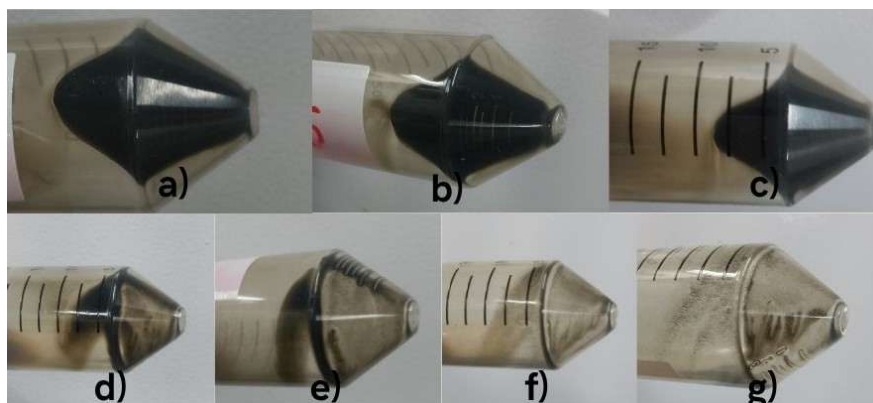
A partir do método fotográfico, o nanofluido apresentou excelente estabilidade estática, com baixíssima sedimentação, que só pôde ser visualizada no 47º dia para a amostra 3. Como observado nas Figuras 6 e 7, a amostra mais concentrada resultou em maior aglomeração, devido à diminuição na distância entre as partículas e, conseqüentemente, a dominância das forças de Van Der Waals atrativas sobre as forças eletrostáticas repulsivas (Chakraborty; Panigrahi, 2020). Regiões aglomeradas possuem peso maior do que o da água, acarretando em sedimentação (Mahbubul, 2019). Trabalhos conduzidos por Vincely (2016) e Liu (2019) apresentam resultados semelhantes, com estabilidade estática de 60 dias e 90 dias, respectivamente. As amostras também foram submetidas à centrifugação, cujos resultados estão representados nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Sedimentação da amostra 2 observada para: a) 5000 RPM; b) 4000 RPM; c) 3000 RPM; d) 2000 RPM; e) 1000 RPM; f) 800 RPM; g) 500 RPM.



Fonte: A autora, 2025.

Figura 6 - Sedimentação da amostra 3 observada para: a) 5000 RPM; b) 4000 RPM; c) 3000 RPM; d) 2000 RPM; e) 1000 RPM; f) 800 RPM; g) 500 RPM.



Fonte: A autora, 2025.

O fluido apresentou princípios de sedimentação a 500 RPM, velocidade considerada baixa para bombas hidráulicas, equipamentos que propulsionam o fluido para circular nos trocadores de calor. Essa análise demonstrou que, apesar da excelente estabilidade estática, o fluido apresenta potencial para melhorar sua estabilidade dinâmica. Isso pode ser alcançado através de sucessivas centrifugações e separação de partículas mais pesadas, até que a suspensão final não apresente nenhuma sedimentação.

5 CONCLUSÃO

Dentre tantas tecnologias e estratégias existentes atualmente para alcançar melhorar a transferência de calor em equipamentos industriais, o presente trabalho estuda uma nova classe de materiais denominada “nanofluidos”, que consistem em suspensões de partículas nanométricas em fluidos convencionais, cujo objetivo é melhorar a transferência térmica de fluidos através do aumento de sua condutividade térmica. Esses materiais possuem menores riscos de aglomeração e maiores áreas superficiais, no entanto sua estabilidade e escalabilidade ainda representam grandes desafios à comunidade científica e à indústria.

Tendo em vista esse cenário, o trabalho propôs como objetivos a síntese e estudo de propriedades termofísicas e estabilidade de um nanofluido composto por óxido de grafeno e água, considerando as excelentes propriedades de materiais baseados em grafeno e o intenso uso da água como fluido em trocadores de calor. A síntese da suspensão de GO utilizou o método de Hummers modificado que foi, posteriormente, foi diluída para concentrações de 0,25% (Amostra 2) e 0,5% m/m (Amostra 3). O aumento de condutividade térmica estimado foi de 7,3% e 11,8% para as Amostras 2 e 3 a 25°C, respectivamente. A temperatura de medição impacta nas medições de condutividade térmica, devido ao aumento do movimento Browniano das moléculas, que aumenta a microconvecção e contribui na taxa de transferência de calor. O aumento percentual de condutividade térmica também é influenciado pelo tamanho (quanto menor as partículas, melhor a condutividade térmica) e concentração das partículas (quanto mais concentrado o fluido, melhor sua condutividade térmica), bem como pela estabilidade do fluido.

Outras propriedades relevantes a trocadores de calor como viscosidade e massa específica também foram avaliadas. O fluido apresentou redução de viscosidade com o aumento da taxa de deformação, isto é, comportamento pseudoplástico, característica que reduz o consumo energético operacional demandado por trocadores de calor. Ao fim do intervalo de avaliação, a viscosidade possuía tendência decrescente, indicando que ainda há bastante estrutura a ser quebrada, por isso a análise precisa ser mais extensa. Do ponto de vista macroscópico, as amostras 2 e 3 apresentaram reduções de massa específica relativa à água de 0,15% e 3,79%, respectivamente, justificadas pela menor massa específica

do óxido de grafeno em água, quando bem disperso. Após a preparação das amostras, foram observados princípios de sedimentação natural após 47 dias, indicando uma excelente estabilidade estática do nanofluido. No entanto, quando submetido à centrifugação, o nanofluido apresentou baixa estabilidade dinâmica, com início de sedimentação abaixo de 500 RPM, rotação muito abaixo da usual em bombas hidráulicas. Por isso, apesar das propriedades termofísicas promissoras, sua estabilidade dinâmica ainda necessita de consideráveis melhorias para a aplicação desejada.

5.1 CONTRIBUIÇÕES

Esse estudo proporcionou contribuições acadêmicas ao campo dos nanofluidos, mediante a investigação experimental das propriedades termofísicas de um nanofluido à base de óxido de grafeno. Os resultados obtidos não apenas oferecem um referencial teórico e metodológico para futuras pesquisas, como também evidenciaram a influência de diversos fatores nas propriedades finais do fluido, como concentração, estrutura molecular, temperatura e a necessidade de investigações mais profundas acerca da divergência nos resultados encontrados na pesquisa bibliográfica realizada nesse trabalho. A relevância científica desta pesquisa alinha-se diretamente com os desafios tecnológicos contemporâneos, particularmente no desenvolvimento de soluções energéticas mais eficientes que atendam aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura). Do ponto de vista aplicado, os achados deste trabalho sugerem perspectivas promissoras para otimização de sistemas térmicos, com potencial para viabilizar projetos de trocadores de calor com maior compactação e eficiência energética, o que pode representar reduções significativas nos custos operacionais em contextos industriais.

5.2 LIMITAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS

Pode-se adotar como perspectiva a produção de maiores volumes de fluido para o teste em trocadores de calor compactos e melhorias em sua estabilidade dinâmica, através de sucessivas centrifugações e separação de partículas mais

pesadas, até que a suspensão final não apresente nenhuma sedimentação. Maiores quantidades de fluido também possibilitam a medição de condutividade térmica e calor específico por equipamentos como o KD2 Pro, para obter as reais propriedades térmicas do fluido. A influência da concentração de partículas sobre o fluido final também poderia ser estudada de forma mais aprofundada, através da preparação de amostras com maior diversidade de concentração mássica.

REFERÊNCIAS

- AL-WAELI. *et al.* An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system. **Energy Conversion and Management**, v. 142, p. 547–558, 2017.
- ALI, Naser. *et al.* Carbon-Based Nanofluids and Their Advances towards Heat Transfer Applications—A Review. **Nanomaterials**, v. 11, n. 6, p. 1628, 2021.
- ALI, Naser; TEIXEIRA, Joao A.; ADDALI, Abdulmajid. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. **Journal of Nanomaterials**, v. 2018, p. 1–33, 2018.
- ALKTRANEE, Mohammed; BENCS, Péter. Factors affecting nanofluids behaviour: A review. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, v. 14, n. 2, 2023.
- ANCO. **Centrífuga Digital Multirrotores CD-20000**, 2020. Disponível em: https://www.ionlab.com.br/centrifuga-digital-anco-ate-20000-rpm-multirrotores?srsId=AfmBOornTUbnNdHYXXUD_d5ZBbNStYaM8GFdaA4pfYorc6qlJ3w8IfAv
- ANTON PAAR GmbH. **The Modular Compact Rheometer Series**, 2024. Disponível em: <https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=18378&L=0>
- BABITA; SHARMA, S.K.; GUPTA, Shipra Mital. Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 79, p. 202–212, 2016.
- BAHIRAEI, Mehdi; HESHMATIAN, Saeed. Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions. **Energy Conversion and Management**, v. 196, p. 1222–1256, 2019.
- BAHIRAEI, Mehdi. *et al.* Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: A critical review. **Applied Thermal Engineering**, v. 133, p. 137–159, 2018.
- BALANDIN, Alexander A. *et al.* Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. **Nano Letters**, v. 8, n. 3, p. 902–907, 2008.
- BERGMAN, T L; LAVINE, Adrienne. **Incropera - Fundamentals of heat and mass transfer**. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc, 2019.
- BIANCO, Vincenzo. *et al.* **Heat Transfer Enhancement with Nanofluids**. [s.l.]: CRC Press, 2015.

BORODE, Adeola; AHMED, Noor; OLUBAMBI, Peter. A review of solar collectors using carbon-based nanofluids. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, p. 118311, 2019.

CARVALHO, Adriana Soares de. **Estruturas baseadas em N-grafeno: síntese, caracterização e aplicação em eletrodos para supercapacitores**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/54680>>.

ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. **Thermodynamics: an Engineering Approach**. 9. ed. New York: Mcgraw-Hill Education, 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 5th. ed. New Delhi: McGraw-Hill, 2024.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: Fundamentals & applications**. 6. ed. New York, Ny: Mcgraw-Hill Education, 2020.

CHAKRABORTY, Samarshi; PANIGRAHI, Pradipta Kumar. Stability of nanofluid: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 174, p. 115259, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119385473>>.

CHAMSA-ARD, Wisut. *et al.* Nanofluid Types, Their Synthesis, Properties and Incorporation in Direct Solar Thermal Collectors: A Review. **Nanomaterials**, v. 7, n. 6, p. 131, 2017.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. www.osti.gov. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/196525>>.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **Ementas/Normativos**. CONFEA | Conselho Federal de Engenharia e Agronomia. Disponível em: <<https://normativos.confea.org.br/Ementas/Visualizar?id=266>>.

DAYOU, Sebastian; WEI, Ting Tiew; VIGOLO, Brigitte. Comparison of heat transfer performance of water-based graphene nanoplatelet- and multi-walled carbon nanotube-nanofluids in a concentric tube heat exchanger. **Diamond and related materials**, v. 125, p. 108976–108976, 2022.

DERJAGUIN, Boris; LANDAU, Lez. Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes. **Acta Physicochim**, v. 14, n. 2, 1944.

DEVENDIRAN, Dhinesh Kumar; AMIRTHAM, Valan Arasu. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, v. 60, p. 21–40, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211600085X>>.

ELMA SCHMIDBAUER. Product Profile. **Elmasonic P 30 H**, 2017. Disponível em: https://www.elma-ultrasonic.com/fileadmin/downloads/Produktprofile/Produktprofile_EN/Ultraschallgeraete/Elmasonic_P/PP_Elmasonic_P30H_EN.pdf

ELSAID, Ashraf Mimi. Experimental study on the heat transfer performance and friction factor characteristics of Co₃O₄ and Al₂O₃ based H₂O/(CH₂OH)₂ nanofluids in a vehicle engine radiator. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 104263, 2019.

ELSAID, Khaled. *et al.* Environmental impacts of nanofluids: A review. **Science of The Total Environment**, v. 763, p. 144202, 2021.

ERDOĞAN, Beytullah. *et al.* The experimental study of the entropy generation and energy performance of nano-fluid flow for automotive radiators. **Engineering Science and Technology an International Journal**, v. 24, n. 3, p. 655–664, 2021.

ESFAHANI, Milad R.; LANGURI, Ehsan M. Exergy analysis of a shell-and-tube heat exchanger using graphene oxide nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 83, p. 100–106, 2017.

FARES, Mohammad; AL-MAYYAH, Mohammad; AL-SAAD, Mohammed. Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 18, p. 100584, 2020.

FOX, Robert W. *et al.* **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9ª. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2018.

GAO, Yuguo. *et al.* Measurement and modeling of thermal conductivity of graphene nanoplatelet water and ethylene glycol base nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 123, p. 97–109, 2018.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GREGORY, John. Approximate expressions for retarded van der waals interaction. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 83, n. 1, p. 138–145, 1981.

GUPTA, Munish. *et al.* A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 638–

- 670, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302988>>.
- HADADIAN, Mahboobeh; GOHARSHADI, Elaheh K.; YOUSSEFI, Abbas. Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 12, 2014.
- HAJJAR, Zeinab; RASHIDI, Ali Morad; GHOZATLOO, Ahmad. Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 128–131, 2014.
- HUMMERS, William S; OFFEMAN, Richard E. Preparation of Graphitic Oxide. [S. l.: s. n.], 1958.
- HUQ, Tahsinul. *et al.* Review on aqueous graphene nanoplatelet Nanofluids: Preparation, Stability, thermophysical Properties, and applications in heat exchangers and solar thermal collectors. **Applied Thermal Engineering**, v. 210, p. 118342, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431122003003>>.
- IJAM, Ali. *et al.* Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 87, p. 92–103, 2015.
- JAMA, Mohamoud. *et al.* Critical Review on Nanofluids: Preparation, Characterization, and Applications. **Journal of Nanomaterials**, v. 2016, p. e6717624, 2016. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jnm/2016/6717624/>>.
- KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 4th. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- KHANAFER, Khalil; VAFAI, Kambiz. A review on the applications of nanofluids in solar energy field. **Renewable Energy**, v. 123, p. 398–406, 2018.
- KRISHNAMOORTHY, Karthikeyan. *et al.* The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation. **Carbon**, v. 53, p. 38–49, 2013.
- KUMANEK, Bogumiła; JANAS, Dawid. Thermal conductivity of carbon nanotube networks: a review. **Journal of Materials Science**, v. 54, n. 10, p. 7397–7427, 2019.
- LIU, Jian. *et al.* Thermodynamic properties and thermal stability of ionic liquid-based nanofluids containing graphene as advanced heat transfer fluids for medium-to-high-temperature applications. **Renewable Energy**, v. 63, p. 519–523, 2014. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113005326?via%3Dihub>>.

LIU, W. I. *et al.* A novel comprehensive experimental study concerned graphene oxide nanoparticles dispersed in water: Synthesise, characterisation, thermal conductivity measurement and present a new approach of RLSF neural network. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 109, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S073519331930199X>>.

LOMASCOLO, Mauro. *et al.* Review of heat transfer in nanofluids: Conductive, convective and radiative experimental results. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1182–1198, 2015.

MAHBUBUL, I.M. **Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid**. Oxford: Elsevier BV, 2019.

MAHESWARAN, Rajalakshmi; SHANMUGAVEL, Balasivanandha Prabu. A Critical Review of the Role of Carbon Nanotubes in the Progress of Next-Generation Electronic Applications. **Journal of Electronic Materials**, v. 51, n. 6, p. 2786–2800, 2022.

MAHIAN, Omid. *et al.* Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows- Part I: Fundamentals and theory. **Physics Reports**, v. 790, p. 1–48, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157318303302>>.

MALKIN, Aleksandr; ISAYEV, Avraam I. **Rheology: concepts, methods, and applications**. 4th. ed. Toronto: Chemtec Publishing, 2022.

MORAN, Michael J. *et al.* **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 8th. ed. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc, 2018.

MU, Xin. *et al.* Thermal Transport in Graphene Oxide – From Ballistic Extreme to Amorphous Limit. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, 2014.

NATESAN, Kapilan; KARINKA, Shashikantha. A comprehensive review of heat transfer enhancement of heat exchanger, heat pipe and electronic components using graphene. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 45, p. 102874, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23001806?via%3Dihub>>.

NETO, Benicio Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Porto Alegre (Rs): Bookman, 2010.

NOVOSELOV, K. S. *et al.* Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. **Science**, v. 306, n. 5696, p. 666–669, 2004.

OKONKWO, Eric C. *et al.* An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 145, n. 6, p. 2817–2872, 2020.

PAOLUCCI, Samuel; PULITI, Gianluca. Properties of Nanofluid. *In*: BIANCO, Vincenzo; MANCA, Oronzio; NARDINI, Sergio; *et al* (Orgs.). **Heat Transfer Enhancement with Nanofluids**. [s.l.]: CRC Press, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/b18324>>.

PAPAGEORGIOU, Dimitrios G.; KINLOCH, Ian A.; YOUNG, Robert J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. **Progress in Materials Science**, v. 90, p. 75–127, 2017. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0079642517300968?token=35C5E901840AC073D63D46C2F13E48301CC03D3FABD5B0B56B04A7297C0E67EACE945C3256296DE1FE3665C73C50B13E>>.

PARVIZ, Dorsa. *et al.* Challenges in Liquid-Phase Exfoliation, Processing, and Assembly of Pristine Graphene. **Advanced Materials**, v. 28, n. 40, p. 8796–8818, 2016.

PERRY, R.H. **Perry's chemical engineers' handbook**. 9. ed. New York, Ny: Mcgraw-Hill Education, 2019.

SADEGHINEZHAD, Emad. *et al.* A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466–487, 2016.

SADEGHINEZHAD, Emad. *et al.* An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 41–51, 2015.

SAID, Zafar. *et al.* Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. **Physics Reports**, v. 946, p. 1–94, 2022.

SHUKLA, Gaurav; AIYER, Hemantkumar. Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 4, p. 2185–2190, 2015.

SIDIK, Nor Azwadi Che. *et al.* A review on preparation methods and challenges of nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 115–125, 2014.

SÖZEN, Adnan; KHANLARI, Ataollah; ÇİFTÇİ, Erdem. Heat transfer enhancement of plate heat exchanger utilizing kaolin-including working fluid. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 233, n. 5, p. 626–634, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177%2F0957650919832445>>.

SUBRAMANIAN, R. *et al.* Experimental analyses on heat transfer performance of TiO₂–water nanofluid in double-pipe counter-flow heat exchanger for various flow regimes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 140, n. 2, p. 603–612, 2019.

SUNDÉN, Bengt; FU, Juan. **Heat Transfer in Aerospace Applications**. 1. ed. [s.l.]: Academic Press, 2016.

TAHA-TIJERINA, Jaime; PEÑA-PARÁS, Laura; MALDONADO-CORTÉS, Demfilo. 2D-Based Nanofluids: Materials Evaluation and Performance. **InTech eBooks**, 2016. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/51152>>.

VERWEY, E.J.W.; OVERBEEK, J.Th.G. Theory of the stability of lyophobic colloids. **Journal of Colloid Science**, v. 10, n. 2, p. 224–225, 1955.

VINCELY, D. Anin; NATARAJAN, E. Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation. **Energy Conversion and Management**, v. 117, p. 1–11, 2016.

WANG, Jin. *et al.* A review on nanofluid stability: preparation and application. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113854–113854, 2023.

YANG, Liu. *et al.* Thermal conductivity enhancement of water by adding graphene Nano-sheets: Consideration of particle loading and temperature effects. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 109, p. 104353, 2019.

YOUNES, Hammad. *et al.* Nanofluids: Key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 207, p. 118202, 2022.

ZAREEI, Maliheh; YOOZBASHIZADEH, Hossein; MADAAH HOSSEINI, Hamid. Investigating the effects of pH, surfactant and ionic strength on the stability of

alumina/water nanofluids using DLVO theory. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 2, p. 1185–1196, 2018.