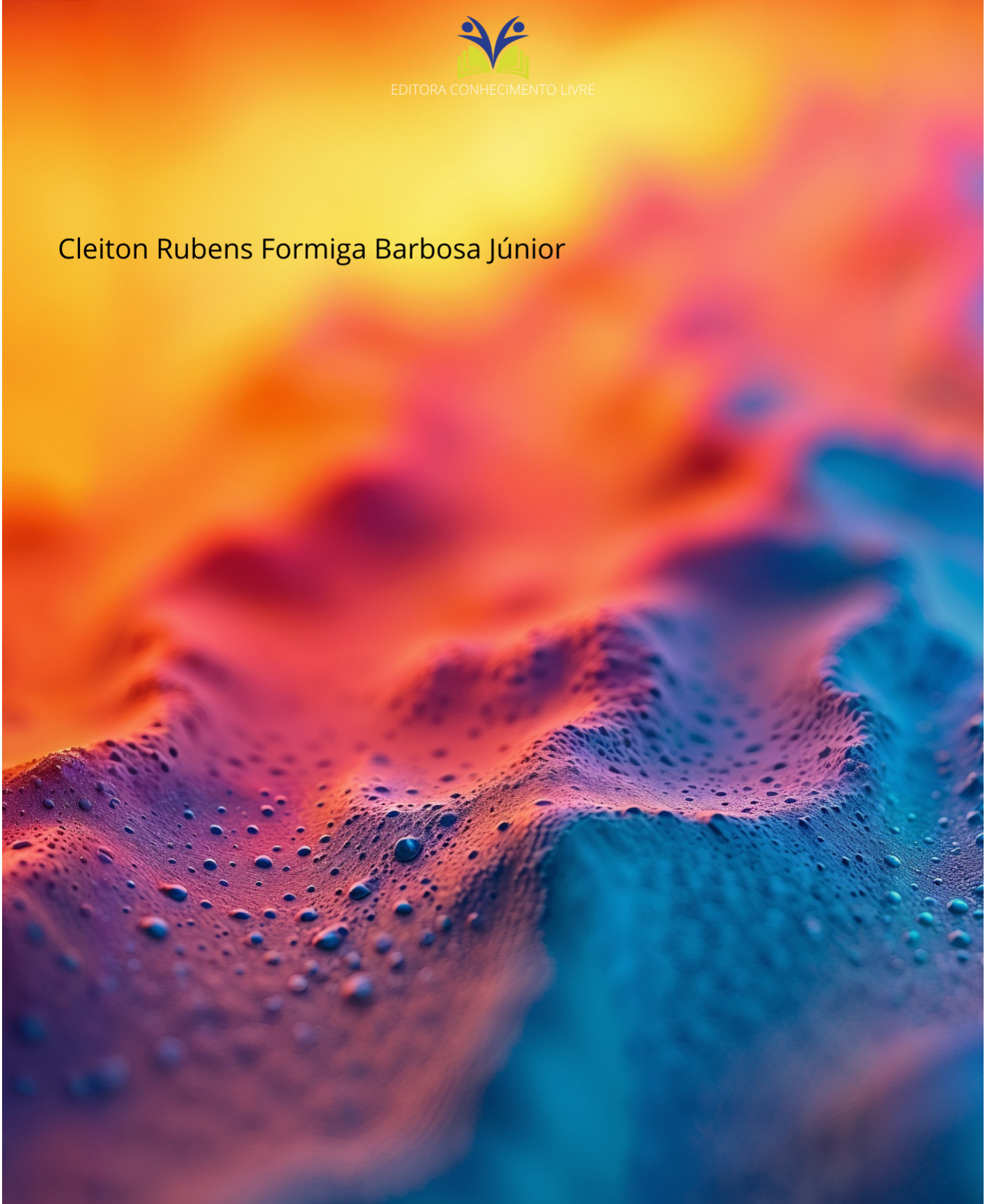


Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior



ESTUDO EXPERIMENTAL DE NANOFLUIDO HÍBRIDO Al_2O_3 -MWCNTs/POE

CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA JÚNIOR

ESTUDO EXPERIMENTAL DE NANOFLUIDO HÍBRIDO Al_2O_3 -MWCNTs/POE

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

JÚNIOR, CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA
J82E ESTUDO EXPERIMENTAL DE NANOFLUIDO HÍBRIDO Al_2O_3 -MWCNTs/POE
/ CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA JÚNIOR. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2025

110 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1229

ISBN: 978-65-5367-724-1

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. nanofluido-híbrido 2. al_2o_3 -mwcnts/poe 3. condutividade-térmica 4. viscosidade 5. lubricidade I.
JÚNIOR, CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1229>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2025.edcl1229



AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa não poderia ter sido concluída com êxito sem as contribuições e os apoios recebidos de diversas pessoas as quais presto aqui a minha homenagem:

Agradeço e louvo inicialmente a Deus, por sempre guiar os meus caminhos e pensamentos.

Agradeço aos meus pais Cleiton Rubens e Lenise Paiva pela educação, paciência e todo amor demonstrados ao longo dos anos, que foram essenciais para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Professor Dr. Francisco de Assis Oliveira Fontes pela confiança em mim depositada, acolhimento, oportunidade, ensinamentos e orientação desta dissertação.

Ao Professor Dr. Ângelo Roncalli Oliveira Guerra pelo incentivo, ensinamentos e oportunidade da realização do estágio à docência.

Ao Professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo incentivo e motivação que impulsionaram esta produção.

Ao amigo Raphael Holanda pelo acolhimento, aconselhamento e trocas de ideias nestes dois anos de caminhada no PPGEM/UFRN.

À minha namorada Heloísa Helena pelo apoio e colaboração ao longo desta jornada, por toda paciência e compreensão, todo amor e carinho.

Aos funcionários da UFRN: Eliane Alves Rocha e Arivaldo Alves (Laboratório de Energia), Luiz Henrique (LabMETROL), Luiz Henrique (PPGEM), Cristiane e Giliane (NUPEQ) pelas diversas contribuições e apoio na execução dos experimentos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica (PPGEM/UFRN) pela oportunidade. A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro durante a realização desta pesquisa.

Aos professores da banca examinadora pelas valiosas contribuições para a conclusão desta pesquisa.

“Deus não escolhe os capacitados,
mas capacita os escolhidos”

Albert Einstein

Resumo: O desenvolvimento de nanopartículas sólidas e a sua dispersão de em um fluido-base para melhoria das propriedades termomecânicas e intensificação dos processos de transferência de calor é um ramo da ciência que tem despertado muito interesse da comunidade científica e impulsionado vários segmentos da indústria nas últimas décadas. Neste contexto, propõe-se investigar um novo nanofluido híbrido a partir da adição de nanopartículas de alumina (Al₂O₃) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) a um óleo lubrificante poliolester (POE), originalmente desenvolvido para aplicação em compressores de refrigeração. As nanopartículas de Al₂O₃ e MWCNTs foram dispersas na proporção 50/50 no óleo POE nas concentrações de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L. O nanofluido híbrido Al₂O₃-MWCNTs/POE foi submetido à processos de sonicação por ultrassom com sonda de imersão e agitação magnética rotativa para melhoria da estabilidade. Propriedades térmicas, reológicas e lubricidade foram mensuradas na faixa de concentração de 0-1,0% e temperaturas de 20 °C a 80 °C. A condutividade térmica do nanofluido híbrido na concentração de 1,00 g/L foi levemente superior ao óleo POE em todas as temperaturas. A viscosidade dinâmica e a lubricidade HFRR do nanofluido híbrido não apresentaram variações significativas em relação ao óleo POE. Finalmente, o nanofluido híbrido Al₂O₃-MWCNTs/POE na concentração de 1,00 g/L foi o que exibiu o melhor conjunto de propriedades termofísicas.

Palavras-chave: nanofluido híbrido, Al₂O₃, MWCNTs, condutividade térmica, viscosidade, lubricidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aplicações práticas da tecnologia dos nanofluidos.....	18
Figura 1.2 – (a) Evolução do número de papers sobre nanofluidos de 2006 a 2018 e (b) papers de nanofluidos simples, híbridos ou review de 2006 a 2016.....	19
Figura 1.3 – Evolução do número de artigos sobre condutividade térmica ou viscosidade de nanofluidos no período de 2006 a 2015	20
Figura 1.4 – Número de artigos publicados sobre nanofluidos híbridos por área de aplicação.....	20
Figura 1.5 – Metodologias e áreas de pesquisa em nanolubrificantes e nanofluidos.....	21
Figura 2.1 – Fluidos-base típicos para nanofluidos híbridos.....	25
Figura 2.2 – Composições típicas de nanopartículas para nanofluidos híbridos.	25
Figura 2.3 – Diferentes técnicas usadas para preparação de nanopartículas híbridas	26
Figura 2.4 – Estratégias de formulação de nanofluidos	27
Figura 2.5 – Preparação de nanofluido simples pelo método de dois passos: (a) sinterização com micro-ondas e (b) mistura direta, surfactantes e ultrassonicação.	29
Figura 2.6 – Preparação de nanofluido híbrido pelo método de dois passos: mistura direta, dispersão e ultrasom.....	30
Figura 2.7 - Ultrassom de imersão: nucleação, crescimento, colapso e implosão de bolhas de cavitação com desfragmentação de nanopartículas do nanofluido.	17
Figura 2.8 – Sedimentação típica das nanopartículas em nanofluidos estáveis e instáveis.	37
Figura 2.9 – Fatores que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos.....	39
Figura 2.10 – Fatores que controlam a condutividade térmica do nanofluido.....	40

Figura 2.11 – Condutividade térmica de nanofluido simples e híbrido com nanopartículas de cobre e nanotubos de carbono de paredes múltiplas.....	41
Figura 2.12 – Variação da condutividade térmica de nanofluido híbrido em função da concentração volumétrica e da temperatura.....	42
Figura 2.13 - Fatores que afetam a viscosidade dos nanofluidos	43
Figura 2.14 – Curvas de viscosidade do nanofluido híbrido MWCNT-Al ₂ O ₃ /SAE40 em diferentes concentrações de 0,0625-1%versustemperatura.....	43
Figura 2.15 – Viscosidade versus temperatura ou concentração do nanofluido híbrido.....	44
Figura 2.16 – Curva de Stribeck mostrando os diferentes regimes de lubrificação como uma função da espessura do filme, a viscosidade e carga normal.	45
Figura 2.17 – Mecanismos de desgaste: (a) adesivo, (b) abrasivo, (c) por fadiga e (d) corrosivo.....	46
Figura 2.18 – Esquema representando a natureza multifísica das interações tribológicas: dois sólidos diferentes com superfícies ásperas e microestruturas materiais relevantes são colocados em contato mecânico e expostos a várias cargas: mecânica, térmica, elétrica e ambiental.....	50
Figura 3.1 – Óleo sintético polioéster POE PZ160 marca Danfoss (a) embalagem comercial e (b) Características técnicas.....	54
Figura 3.2 – Nanopartículas de Al ₂ O ₃ : (a) amostra Al ₂ O ₃ e embalagem comercial, (b) Especificações técnicas e (c) Imagem de TEM.....	55
Figura 3.3 – Nanotubos de carbono de paredes múltiplas MWCNTs: (a) amostra e embalagem comercial, (b) Especificações técnicas e (c) Imagem de TEM.	56
Figura 3.4 – Amostras de nanofluidos híbridos, simples e fluido-base:.....	57
Figura 3.5 – Medição das massas das nanopartículas de Al ₂ O ₃ e MWCNTs para diferentes amostras de nanofluido híbrido.....	58

Figura 3.6 – Desfragmentação das nanopartículas aglomeradas no fluido-base do nanofluido por meio de ultrassom de imersão: (a) display, (b) cabeçote e (c) Ponteira de imersão.....	59
Figura 3.7 - Amostras de nanofluidos híbridos e simples acondicionadas em tubos de ensaio e Falcon para verificação da ocorrência de sedim.....	60
Figura 3.8 – Bancada experimental de medição das propriedades termofísicas de nanofluidos híbridos e simples.....	61
Figura 3.9 – Medição de condutibilidade térmica com analisador de propriedades térmicas KD2 Pro: (a) bancada simplificada (b) foto do conjunto experimental.....	62
Figura 3.10 – Medição de viscosidade dinâmica com reômetro LVDVIII-Ultra da Brookfield: (a) bancada simplificada (b) foto do conjunto experimental.	63
Figura 3.11– Bancada de Teste de Lubricidade HFRR	64
Figura 4.1 – Condutividade térmica dos nanofluidos híbridos MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE e simples (Al ₂ O ₃ /POE e MWCNTs/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE versus temperatura..	68
Figura 4.2 – Condutividade térmica dos nanofluidos híbridos MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE e com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE versus temperatura	68
Figura 4.3 – Condutividade térmica dos nanofluidos simples Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE versus temperatura.....	69
Figura 4.4 – Condutividade térmica dos nanofluidos simples MWCNTs/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0g/L e do óleo POE versus temperatura.....	69
Figura 4.5 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos simples Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L versus temperatura	71
Figura 4.6 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos simples MWCNTs/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L versus temperatura	72

Figura 4.7 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L e versus temperatura	72
Figura 4.8 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE e simples (Al ₂ O ₃ /POE, MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L versus temperatura	73
Figura 4.9 – Coeficiente de atrito do óleo POE e de nanofluidos híbrido (MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE) e simples (Al ₂ O ₃ /POE, MWCNTs/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L versus tempo	75
Figura 4.10 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluidos híbrido (MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L versus tempo	76
Figura 4.11 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluido simples Al ₂ O ₃ /POE, com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L versus tempo.....	76
Figura 4.12 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluido simples MWCNTs/POE, com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L versus tempo.....	77
Figura 4.13 – Imagens das escaras de desgaste das esferas dos ensaios de lubricidade HFRR dos nanofluidos híbridos e simples em diferentes concentrações de nanopartículas	77
Figura A.1 – Condutividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,1 g/L versus temperatura.....	88
Figura A.2 – Condutividade térmica do nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	88
Figura A.3 – Condutividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	89

Figura A.4 – Condutividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 1,00 g/L versus temperatura.....	89
Figura A.5 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	90
Figura A.6 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	90
Figura A.7 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	91
Figura A.8 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,00 g/L versus temperatura.....	91
Figura A.9 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,1 g/L versus temperatura.....	92
Figura A.10 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	92
Figura A.11 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,50 g/L versus temperatura.	93
Figura A.12 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 1,00 g/L versus temperatura.	93
Figura A.13 –Condutividade térmica óleo POE puro versus temperatura.....	94
Figura B.1 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	95
Figura B.2 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	95
Figura B.3 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	96
Figura B.4 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 1,0 g/L versus temperatura.....	96

Figura B.5 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	97
Figura B.6 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	97
Figura B.7 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	98
Figura B.8 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,0 g/L versus temperatura.....	98
Figura B.9 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,1 g/L versus temperatura.....	99
Figura B.10 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	99
Figura B.11 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 0,50 g/L versus temperatura.	100
Figura B.12 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE com concentração de 1,0 g/L versus temperatura.....	100
Figura B.13 – Viscosidade dinâmica do óleo POE puro versus temperatura	101
Figura C.1 – Resistividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	102
Figura C.2 – Resistividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	102
Figura C.3 – Resistividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	103
Figura C.4 – Resistividade térmica de nanofluido Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 1,00 g/L versus temperatura.....	103

Figura C.5 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	104
Figura C.6 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	104
Figura C.7 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	105
Figura C.8 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,00 g/L versus temperatura.....	105
Figura C.9 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,10 g/L versus temperatura.....	106
Figura C.10 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,25 g/L versus temperatura.....	106
Figura C.11 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 0,50 g/L versus temperatura.....	107
Figura C.12 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE na concentração de 1,00 g/L versus temperatura.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM – Microscopia eletrônica de força atômica

Al₂O₃ – Óxidos de alumínio (Alumina)

CNTs – nanotubos de carbono

EDX – Espectroscopia de raios X por dispersão em energia

HFRR – (High Frequenc Reciprocatation Ring)

KD2 Pro – Analisador de propriedades térmicas

MWCNTs – nanotubos de carbono de paredes múltiplas

NP – nanopartícula

PH – potencial Hidrogeniônico

POE – Óleo sintético Polioester

POE 160PZ – Óleo sintético Polioester Danfoss

SEM – Microscopia eletrônica de varredura

SRCV – Sistema de Refrigeração por Compressão de Vapor

SWCNTs – nanotubos de carbono de parede simples

TEM – Microscopia eletrônica de transmissão

TGA – Análise termogravimétrica

WSD – (Wear Scar Diameter) = diâmetro da escara de desgaste

XRD - Espectroscopia de raios X por dispersão

LISTA DE SÍMBOLOS

μ = viscosidade dinâmica [cP]

g/L = grama por litro

Rq1 = rugosidade das superfícies de rolamento

Rq2 = rugosidade das superfícies de rolamento

w = massa do material [g].

y = espessura do filme hidrodinâmico para superfícies lisas

ρ = densidade [g/cm³]

Φ = concentração volumétrica [%], mássica [%] ou gravimétrica [g/L];

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS.....	23
2.1.1 O MÉTODO DE UM PASSO.....	26
2.1.2 O MÉTODO DE DOIS PASSOS.....	28
2.1.3 CONCENTRAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS.....	30
2.2 ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS	32
2.2.1 MECANISMOS DE MELHORIA DA ESTABILIDADE	33
2.2.2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE.....	35
2.2.2.1 O MÉTODO DA SEDIMENTAÇÃO.....	35
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	37
2.3.1 A CONDUTIVIDADE TÉRMICA	37
2.3.2 VISCOSIDADE DINÂMICA.....	42
2.4 TRIBOLOGIA	44
2.4.1 PRINCÍPIOS DO ATRITO E DESGASTE	44
2.4.2 LUBRICIDADE PELO MÉTODO HFRR.....	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS DO NANOFLUIDO HÍBRIDO.....	52
3.1.1 FLUIDO-BASE: ÓLEO SINTÉTICO POE	53
3.1.2 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDOS DE ALUMÍNIO (Al ₂ O ₃)	54
3.1.3 NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS (MWCNTS).....	55
3.2 MÉTODO DE PREPARAÇÃO DO NANOFLUIDO HÍBRIDO.....	56
3.3 ESTABILIDADE DO NANOFLUIDO.....	59
3.4 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	60

3.4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO NANOFLUIDO	61
3.4.2 VISCOSIDADE DO NANOFLUIDO	63
3.4.3 TESTE DE LUBRICIDADE HFRR	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	66
4.2 VISCOSIDADE DINÂMICA	70
4.3 LUBRICIDADE HFRR	73
5 CONCLUSÕES	78
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
6 REFERÊNCIAS	80
7 APÊNDICES	85
APÊNDICE A	87
APÊNDICE B	94
APÊNDICE C	101

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório tem como propósitos a contextualização e delimitação do foco da investigação, apresentação dos objetivos geral e específicos da pesquisa experimental e ainda estrutura organizacional do documento, com intuito de estimular e facilitar a compreensão da dissertação.

1.1 MOTIVAÇÃO

No mundo contemporâneo, o equacionamento das demandas de energia com o meio ambiente sustentável tem sido o principal desafio da humanidade. Nas nações desenvolvidas, a diversificação e o crescimento de energia limpa em sua matriz energética tornou-se a principal prioridade. Pesquisadores afirmam que o transporte e a conversão de energia ocorrem, fundamentalmente, em escala atômica ou molecular.

Neste contexto, a nanociência e a nanotecnologia têm um papel significativo na revitalização das indústrias tradicionais de energia e no estímulo às indústrias emergentes de energia renovável. Nas últimas duas décadas, a ciência e a tecnologia da escala nanométrica têm proporcionado soluções eficientes para muitas demandas da indústria, em especial, relacionadas aos processos de transferência de calor.

Entre todas as formas de energia consumidas atualmente no mundo, cerca de 70% são produzidas na forma de calor. Em muitos setores da indústria, é necessário o transporte de grandes quantidades de energia, na forma de calor, para exequibilidade dos processos. Com o aumento da demanda de energia em todo o mundo, tem-se intensificado os processos de transferência de calor e a redução das perdas de energia são cada vez mais prementes.

No âmbito da nanotecnologia, o conceito de “nanofluido” que consiste basicamente de uma mistura bifásica contendo nanopartículas sólidas em suspensão no fluido-base, (óleo, água, etileno glicol, gás refrigerante etc.) é capaz de conferir ao fluido térmico convencional alto desempenho dos processos de transferência de calor da indústria (da mobilidade, de energia, bélica, eletrônica, de alimentos, na medicina etc).

De acordo com a literatura especializada, os nanomateriais mais amplamente utilizados na sinterização destes nanofluidos, tanto para o desenvolvimento de novos produtos ou para intensificação dos processos de trocas térmicas de várias demandas industriais, são: (1) os nanotubos

de carbono – de paredes simples ou múltiplas (SWCNTs ou MWCNTs), (2) óxidos de alumínio ou alumina (Al₂O₃) e (3) os óxidos de titânio (TiO₂).

A primeira geração de nanofluidos, conhecida no meio acadêmico como “nanofluidos” ou ainda “nanofluidos simples” foi objeto de intensa investigação nas duas últimas décadas e tem como característica principal o fato destes materiais serem constituídos a partir de um único tipo de nanopartícula sólida em suspensão num fluido-base.

Esta geração pioneira de nanofluidos tem promovido ganhos significativos de eficiência térmica em trocadores de calor dos mais variados ramos da indústria (automotiva, refrigeração e climatização, alimentícia, eletroeletrônica etc.) comparativamente ao emprego dos fluidos térmicos convencionais, uma vez que a condutividade térmica das partículas sólidas em suspensão é incontestavelmente muito superior à do fluido-base.

A Figura 1.1 de TAWFIK (2017) ilustra alguns setores de aplicação dos nanofluidos para melhoria os processos e trocas térmicas, entre elas destacam-se atualmente: (i) indústria automobilística, (ii) resfriamento de equipamentos eletrônicos, (iii) medicina, (iv) indústria de higiene e limpeza (i) indústria militar e (vi) indústria de energia solar.

Figura 1.1 – Aplicações práticas da tecnologia dos nanofluidos.



Fonte: Adaptado de TAWFIK (2017)

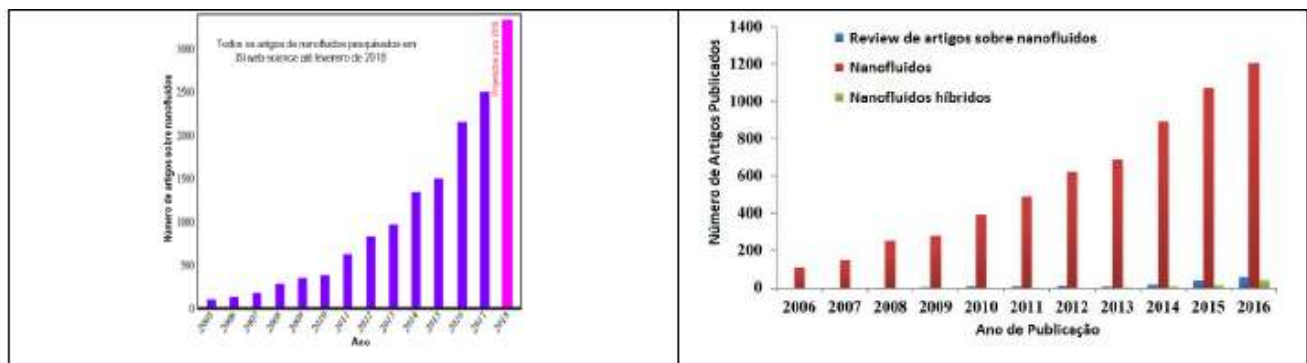
Com o avanço vertiginoso da nanotecnologia dos últimos anos surgiu a segunda geração de nanofluidos, denominada “nanofluidos híbridos” que é uma extensão ou variante dos nanofluidos de primeira geração, com a particularidade de ser caracterizada pela adição de duas ou mais nanopartículas dissimilares dispersas em suspensão em um fluido-base.

A inclusão de mais de um tipo de nanopartícula no fluido-base tem como finalidade potencializar ou promover a melhoria das características de transferência de calor e/ou reológicas dos nanofluidos híbridos, através dos efeitos sinérgicos das nanopartículas sólidas dissimilares, isto é, mediante a combinação eficiente das propriedades termofísicas dos nanomateriais em suspensão no fluido-base.

Essa nova geração de nanofluidos híbridos apresenta forte impacto no desenvolvimento de novos produtos visando o atendimento de demandas específicas da indústria, principalmente aquelas em que o trinômio custo-benefício-sustentabilidade é a prioridade a ser alcançada.

KHODADADI *et al* (2018) apresentaram na Figura 1.2 (a) evolução do número de artigos científicos publicados na plataforma ISI web de 2006 a 2018. Na Figura 1.2 (b), BABU *et al* (2017) mostram a evolução do número de artigos publicados por classe de nanofluido: simples ou híbrido.

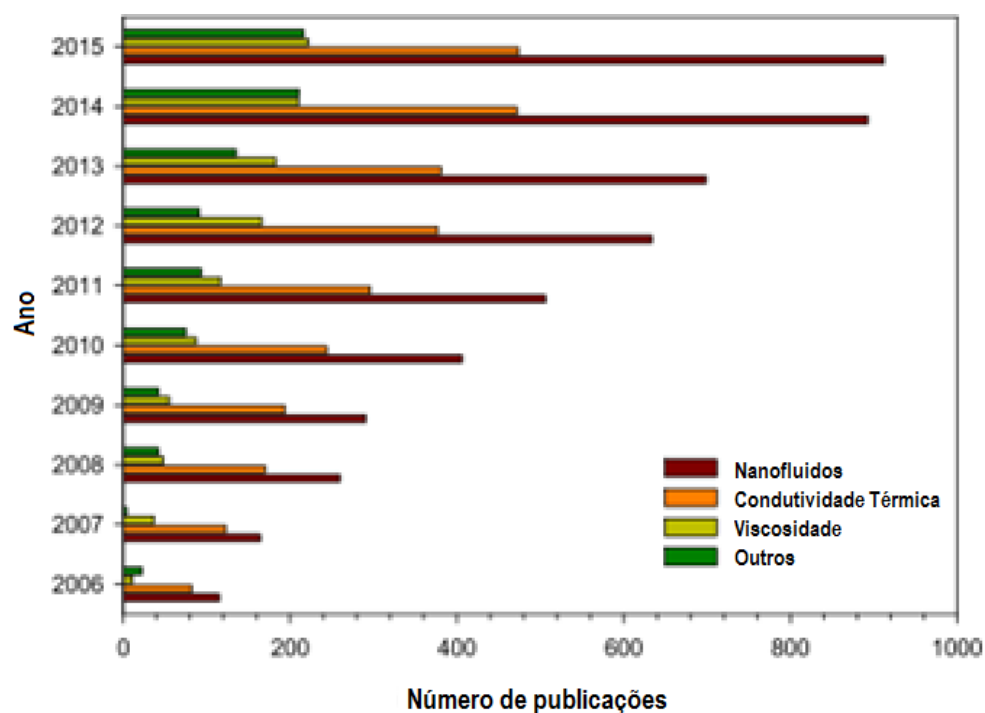
Figura 1.2 – (a) evolução do número de artigos sobre nanofluidos de 2006 a 2018 e (b) artigos de nanofluidos simples, híbridos ou review de 2006 a 2016.



Fonte: Adaptado de KHODADADI *et al* (2018) e BABU *et al* (2017)

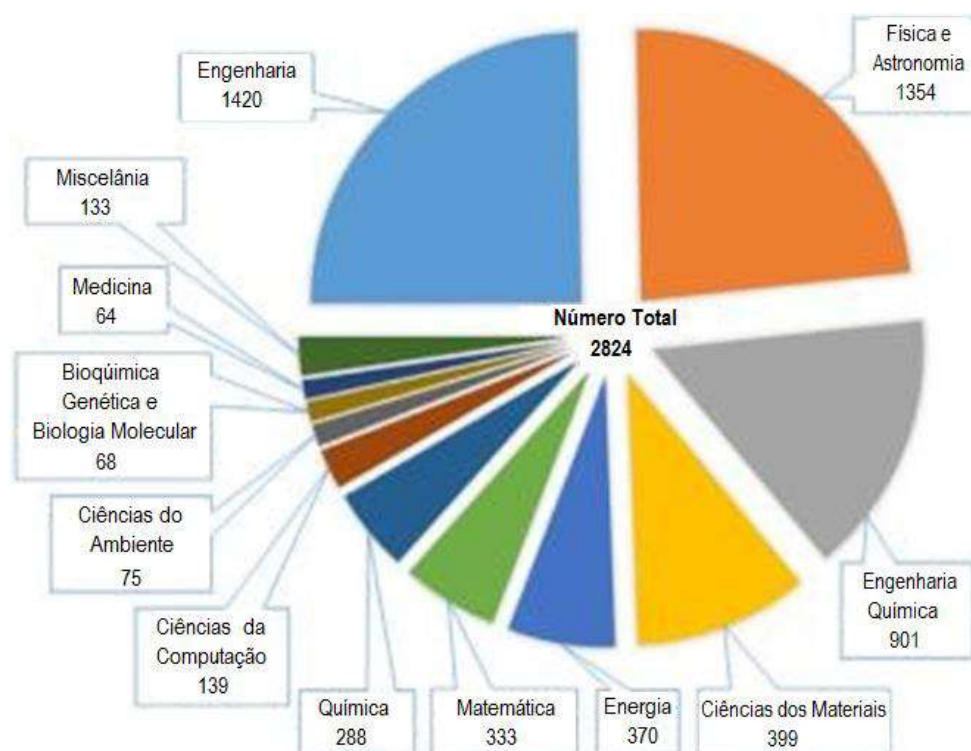
Em ambos os casos, há uma tendência de crescimento acentuada das publicações sobre nanofluidos nos períodos considerados. A produção de artigos sobre “nanofluidos simples” está consolidada, enquanto os “nanofluidos híbridos” apresentam perspectivas de crescimento em razão do grande potencial de aplicação da tecnologia. A Figura 1.3 mostra os artigos de nanofluidos publicados de 2006 a 2015 sobre condutividade térmica e viscosidade. A Figura 1.4 apresenta a evolução do número de artigos publicados sobre nanofluidos por área de aplicação.

Figura 1.3 – Evolução do número de artigos sobre condutividade térmica ou viscosidade de nanofluidos no período de 2006 a 2015



Fonte: Adaptado de MURSHED e ESTELÉ (2017)

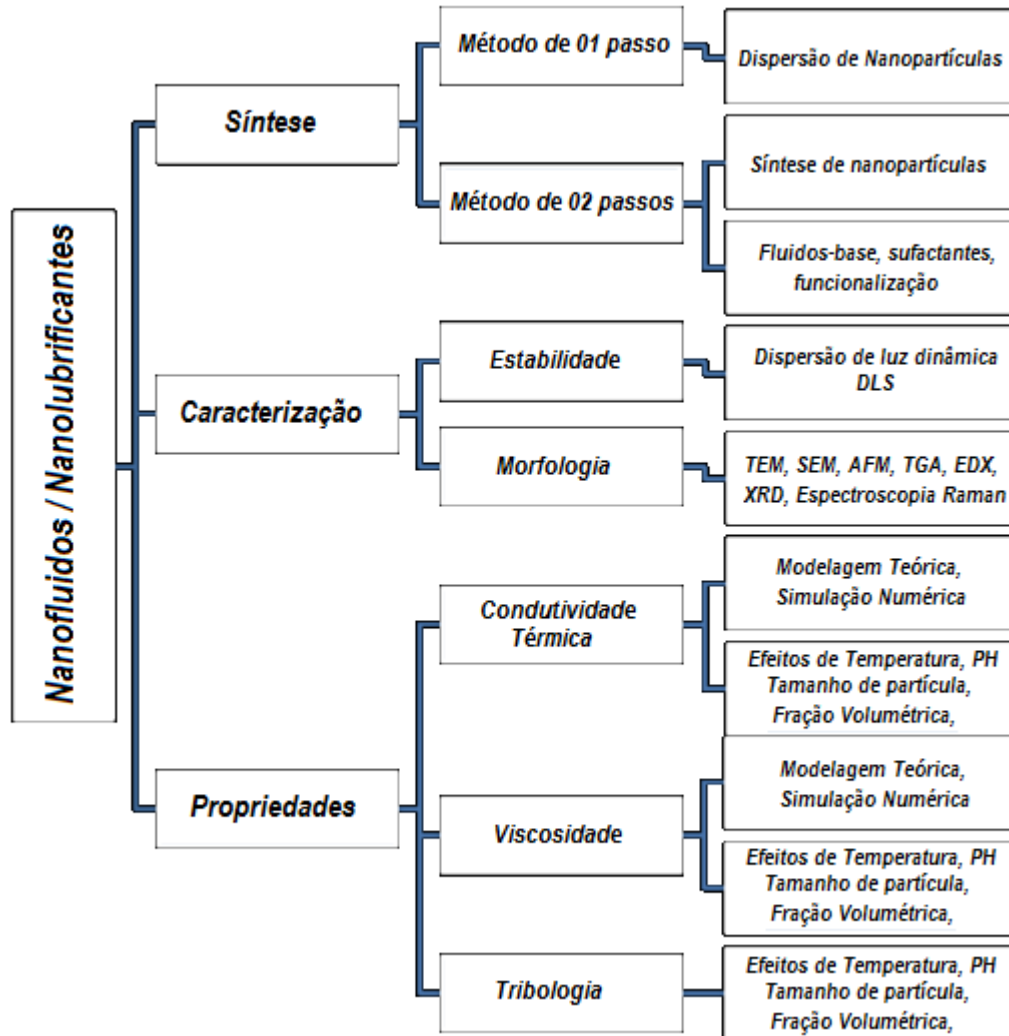
Figura 1.4 – Número de artigos publicados sobre nanofluidos híbridos por área de aplicação.



Fonte: Adaptado de EGGERS e KABELAC (2016)

A Figura 1.5 extraída de RASHEED (2017) apresenta um fluxograma simplificado contendo as principais metodologias e áreas de pesquisa em nanofluidos e nanolubrificantes.

Figura 1.5 – Metodologias e áreas de pesquisa em nanolubrificantes e nanofluidos.



Fonte: Adaptado de RASHEED (2017)

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa teve como propósito investigar a influência da concentração das nanopartículas e temperatura nas propriedades termomecânicas de um nanofluido híbrido, composto de um óleo lubrificante de compressores de refrigeração (fluido-base) e duas nanopartículas.

Para tanto, foram estabelecidos ainda os objetivos específicos:

I. Seleção dos materiais constituintes para formulação do nanofluido híbrido: o fluido-base e as duas nanopartículas sólidas;

- II. Preparação pelo “método de dois passos” do nanofluido híbrido proposto em diferentes concentrações;
- III. Medição da condutibilidade térmica e viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos simples e híbrido com diferentes concentrações de nanopartículas;
- IV. Medição do coeficiente de atrito e lubricidade das amostras de nanofluidos simples e híbrido pelo método tribológico HFRR;
- V. Análise da influência da temperatura e concentração das nanopartículas nas propriedades termofísicas do nanofluidos simples e híbrido propostos;
- VI. Análise das propriedades termofísicas e do desempenho tribológico dos nanofluidos híbridos propostos com relação ao fluido-base e aos nanofluidos simples;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para melhor compreensão do leitor esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução. O segundo capítulo a revisão da literatura com foco na preparação dos nanofluidos, estabilidade, nas propriedades termo-reológicas e desempenho tribológico pelo método HFRR.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento e análise de performance dos nanofluidos híbridos propostos na pesquisa.

O quarto capítulo mostra os resultados mais relevantes da pesquisa trazendo discussões, alicerçadas na revisão da literatura, com intuito de estabelecer a compreensão dos diferentes fenômenos observados na investigação.

Finalmente, no quinto e último capítulo são estabelecidas as principais conclusões da pesquisa e ainda são sugeridos alguns tópicos que poderão ser explorados em trabalhos futuros, visando a absorção e/ou ampliação do conhecimento inerente ao tema nanofluidos híbridos.

O documento contém ainda os apêndices com informações relevantes sobre diferentes aspectos relativos ao desenvolvimento da investigação e a relação das principais referências bibliográficas que fundamentam o texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo de revisão são abordados vários temas sobre nanofluidos híbridos que tem relação direta com o foco da pesquisa, incluindo os métodos de preparação, a estabilidade, as características dos nanofluidos híbridos, as principais propriedades termomecânicas e ainda a análise tribológica de lubricidade pelo método HFRR.

2.1 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

Para a grande maioria dos pesquisadores consultados, a metodologia utilizada na preparação dos nanofluidos é essencial e define sua estabilidade e qualidade. O nanofluido não é simplesmente uma mistura bifásica, contendo nanopartículas sólidas imersas em um fluido térmico convencional, seu comportamento termomecânico é complexo e está intimamente relacionado com as propriedades coligativas e estas, por sua vez, são fortemente dependentes das características dos seus constituintes e também do grau de estabilidade da solução coloidal.

KUMAR e ARASU (2018) comentam que nos últimos anos, a atenção está voltada para pesquisas envolvendo a impregnação de mais de uma nanopartícula no fluido-base, chamados nanofluidos híbridos ou compostos e que os estudos de pesquisa sobre nanofluidos contendo nanopartículas compostas apresentaram melhores características térmicas e reológicas em comparação com nanopartículas simples.

Estes pesquisadores fazem uma revisão sobre os métodos de preparação, caracterização, propriedades e estabilidade dos nano-líquidos híbridos. Os modelos para propriedades como condutividade térmica, viscosidade, densidade, calor específico, fator de atrito e coeficiente de transferência de calor de nanofluidos híbridos são apresentados. Por fim, o potencial de aplicação dos nanofluidos híbridos e os desafios incluindo métodos de estabilidade são discutidos.

SARKAR *et al.* (2015) fazem uma revisão das pesquisas recentes sobre síntese, propriedades termofísicas, características de transferência de calor e queda de pressão, e possíveis aplicações e desafios de nanofluidos híbridos. De acordo com estes pesquisadores, a hibridização adequada pode tornar os nanofluidos híbridos muito promissores para a melhoria da transferência de calor, no entanto, muitos trabalhos de pesquisa ainda são necessários nos campos de preparação e estabilidade, caracterização e aplicações para superar os desafios. Comentam ainda que a idéia de usar nanofluidos híbridos é para melhorar ainda mais as características de transferência de calor e queda de pressão, aproveitando melhor o efeito sinérgico dos nanomateriais.

SIDIK *et al.* (2014) publicaram uma revisão dos métodos de preparação de nanofluidos relatados por diferentes pesquisadores. Eles consideram o nanofluido como uma nova espécie de material de engenharia composto de aditivos de dimensões nanométricas e o fluido-base, tendo atraído grande atenção dos pesquisadores por suas propriedades térmicas superiores e muitas aplicações potenciais. Vários tipos de nanopartículas com diferentes fluidos-base são investigados. Além disso, os desafios e direções futuras de aplicações de nanofluidos foram revisados e apresentados no documento. Finalmente, relatam que o objetivo da revisão foi resumir os desenvolvimentos recentes em pesquisas sobre a síntese e caracterização de nanofluidos e tentar encontrar algumas questões desafiadoras que precisam ser resolvidas para pesquisas futuras.

DEVENDIRAN e AMIRTHAM (2016) comentam que as pesquisas sobre nanofluidos estão em ascensão devido à sua aplicação como fluidos de transferência de calor em uma ampla variedade de aplicações e que mais recentemente, a tecnologia de nanofluidos tem uma nova dimensão de impregnar duas ou mais nanopartículas no fluido-base formando nanofluidos híbridos ou compostos.

O artigo analisa a preparação de nanofluidos híbridos e simples e ainda as várias técnicas que são usadas para investigar as propriedades físicas e características dos nanofluidos.

Propriedades térmicas e de transferência de calor de nanofluidos, incluindo a condutividade térmica, viscosidade e modelos específicos de calor para nanofluidos são apresentados. Finalmente, várias áreas de aplicação de nanofluidos, como transporte, resfriamento eletrônico, armazenamento de energia, aplicações mecânicas etc. são também discutidas.

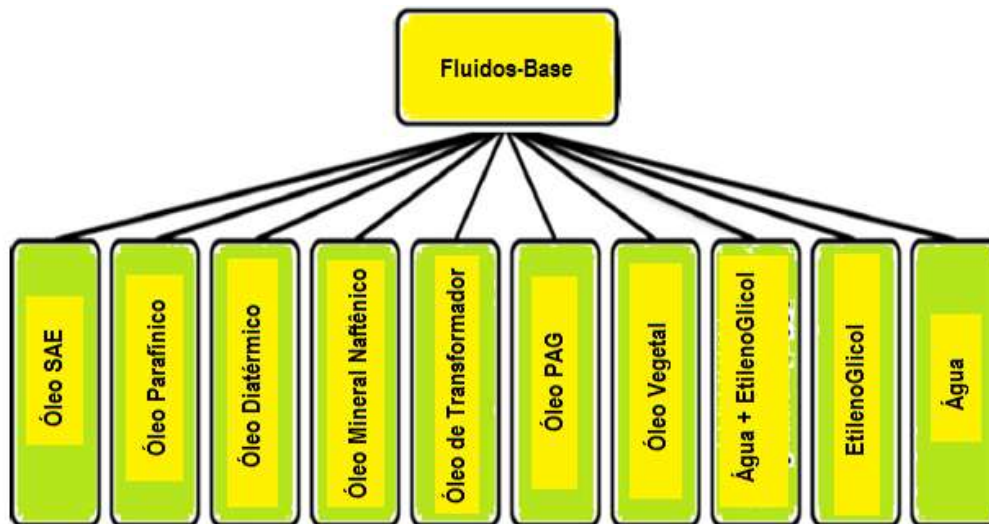
DE OLIVEIRA (2018) afirma que, segundo a teoria coloidal, a sedimentação em suspensões cessa quando a dimensão da partícula é menor que um raio crítico, devido ao equilíbrio entre as forças gravitacionais e as forças brownianas. E quanto menor for o tamanho da partícula, mais elevada será sua energia superficial, o que contribui para aglomeração das nanopartículas imersas no meio fluido.

Assim, segundo a pesquisadora, a concentração e o tamanho das nanopartículas sólidas dispersas no fluido-base aliada à qualidade do método de preparação do nanofluido afetam significativamente o grau de estabilidade e portanto, influenciam substancialmente nas propriedades do nanofluido.

Na formulação de nanofluidos simples ou híbridos atualmente, encontram-se disponíveis comercialmente várias partículas sólidas na forma de nano-pós, com características dimensionais, morfológicas e propriedades termofísicas distintas. Além disso, existem diversos fluidos térmicos para uso em nanofluidos.

A Figura 2.1, extraída de SAJID e ALI (2018), mostra os materiais mais frequentemente utilizados na formulação dos nanofluidos híbridos que são desenvolvidos para diversas aplicações de engenharia.

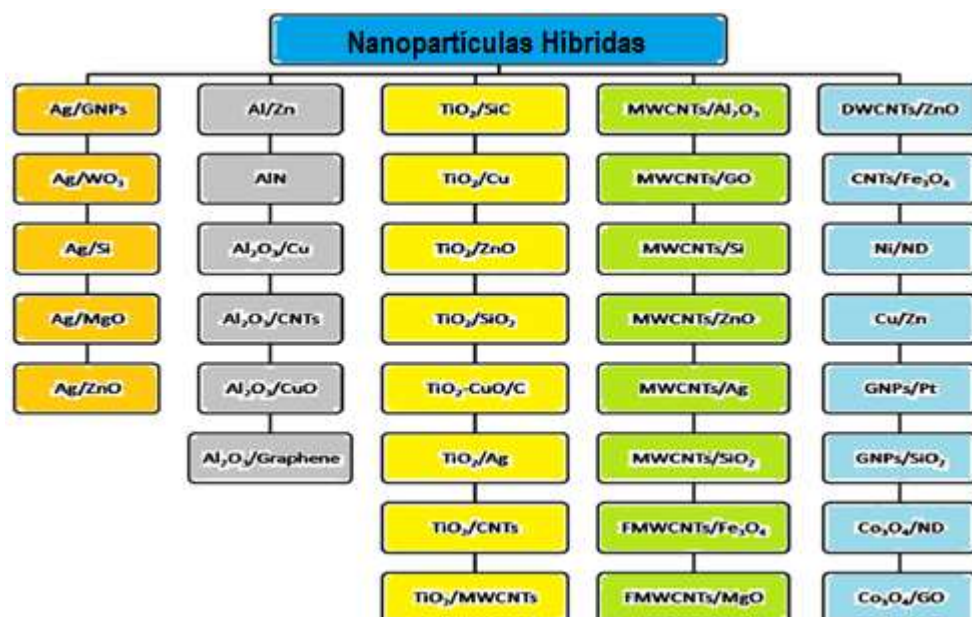
Figura 2.1 – Fluidos-base típicos para nanofluidos híbridos.



Fonte: Adaptado de SAJID e ALI (2018)

A Figura 2.2 apresenta as composições típicas de nanopartículas sólidas frequentemente utilizadas por pesquisadores no desenvolvimento de nanofluidos híbridos, para atendimento dos mais variados requisitos de projeto.

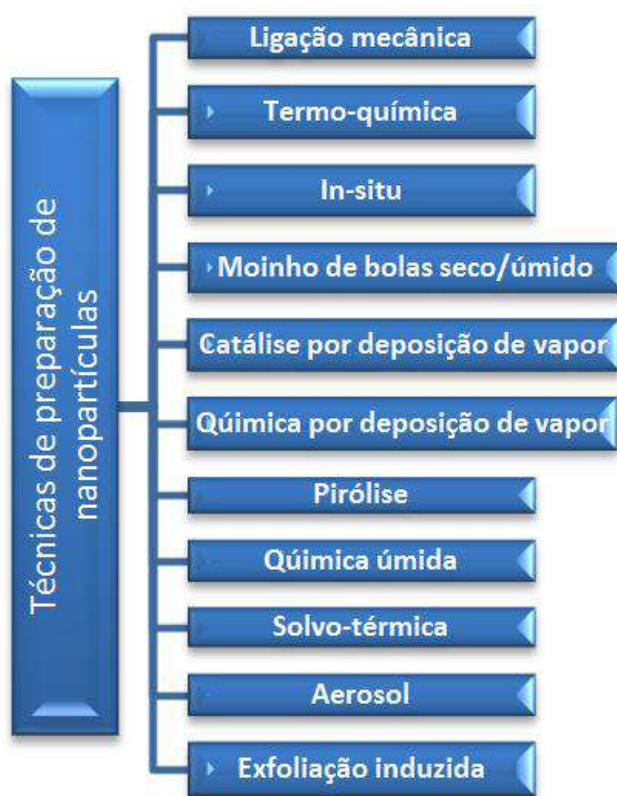
Figura 2.2 – Composições típicas de nanopartículas para nanofluidos híbridos.



Fonte: Adaptado de SAJID e ALI (2018)

Para SAJID e ALI (2018) há muitas técnicas disponíveis na literatura que possibilitam a síntese de nanofluidos híbridos. A Figura 2.3 apresenta os principais processos de sinterização de nanopartículas híbridas.

Figura 2.3 – Diferentes técnicas usadas para preparação de nanopartículas híbridas

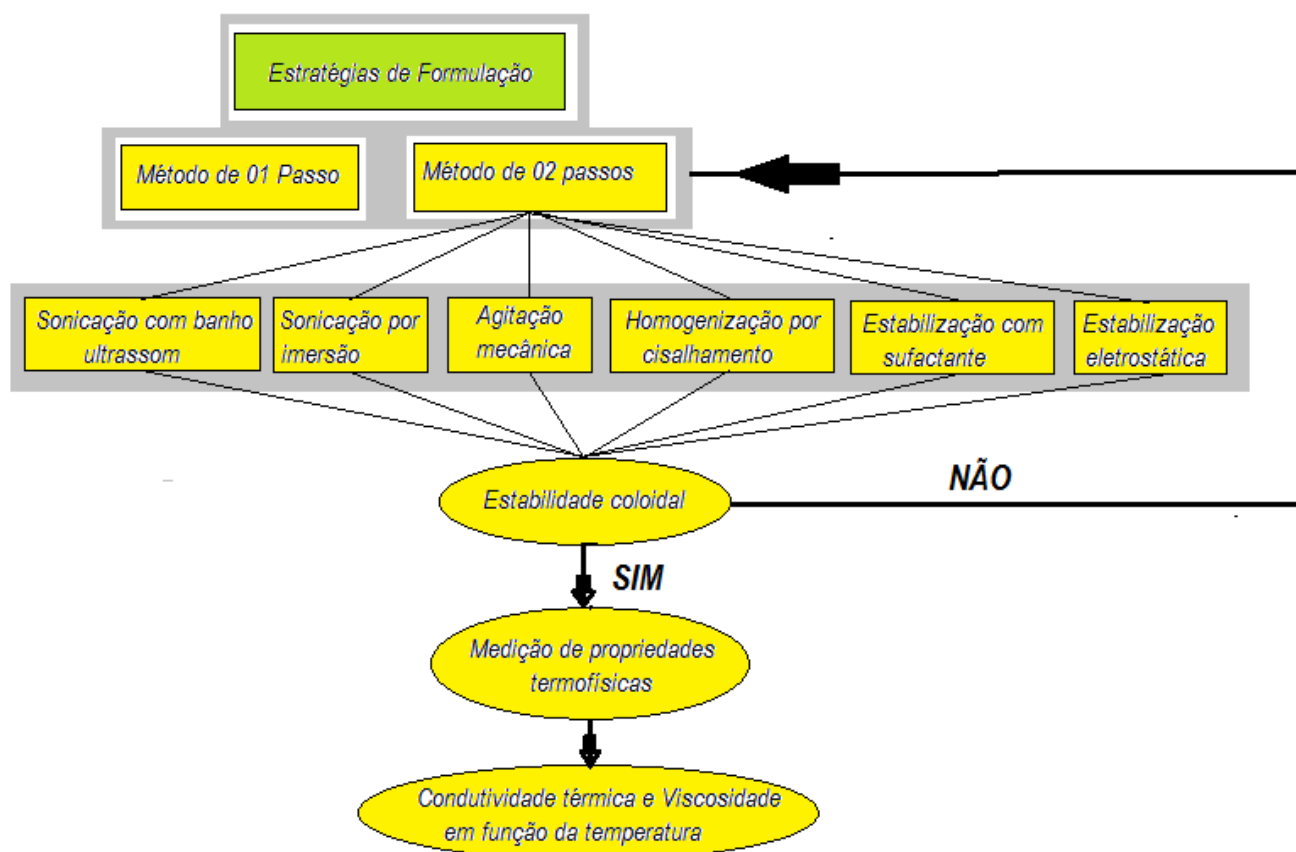


Fonte: Adaptado de SAJID e ALI (2018)

2.1.1 O MÉTODO DE UM PASSO

SAJID e ALI (2018) descrevem que neste método de preparação a síntese e a dispersão das nanopartículas sólidas no fluido-base ocorrem de forma simultânea. No método de uma única etapa inexistem tediosos eventos de secar, armazenar e misturar nanopartículas sólidas ao fluido-base.

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma com as estratégias para preparação de nanofluidos híbridos ou simples empregando os métodos de “um passo” ou de “dois passos”.

Figura 2.4 – Estratégias de formulação de nanofluidos.

Fonte: Adaptado de SAJID e ALI (2017)

Muitos pesquisadores também comentam que no método de passo único são produzidos nanofluidos híbridos com estabilidade e dispersão das nanopartículas sólidas no fluido-base muito superior àquelas obtidas no método de dois passos.

A Tabela 2.1 apresenta métodos de preparação de nanofluidos híbridos utilizados por diversos pesquisadores.

Tabela 2.1 – Nanofluidos híbridos e métodos de preparação

Nanopartículas	Fluido-base	Método de Preparação	Tempo de Sonicação	Sufactante
Al ₂ O ₃ -MWCNTs	Óleo térmico	2 passos	1 h	-
Al ₂ O ₃ -Cu	Etileno glicol	2 passos	7 h	-
SiC-TiO ₂	Óleo diatérmico	2 passos	2 h	Ácido Oleico
SiO ₂ -TiO ₂	Água e Etileno glicol (60:40)	2 passos	2 h	-
SiO ₂ -TiO ₂	Água e Etileno glicol (60:40)	2 passos	90 min	-
ZnO-Ag	Água	2 passos	3 h	-
FMWCNTs-Fe ₃ O ₄	Etileno glicol	2 passos	5.5 h	-
Ag- MWCNTs	Água	2 passos	3 h	-
Al ₂ O ₃ -CuO	Água e Etileno glicol (75:25)	2 passos	16 h	-
TiO ₂ -Ag	Água	2 passos	1 h	-
CuO-Al ₂ O ₃	Água	2 passos	4 h	-
Al ₂ O ₃ -Cu	Água	2 passos	6 h	(SLS)
MWCNTs-γ Al ₂ O ₃	Água	2 passos	6 h	(GA)
Ag-MgO	Água	2 passos	3 h	CTAB
SiO ₂ -graphene	Óleo Mineral Naftênico	2 passos	4 h	-
N-(rGO-MWCNTs)	Água, Etileno glicol	2 passos	30 min	SLS and PEG
Silica-Ag	Óleo de Transformador	1 passo	-	-
MWCNTs-Ag	Água	1 passo	40 min	-
Ag-MWCNTs	Água DI, Etileno glicol	2 passos	40 min	-
Au-MWCNTs				
Pd-MWCNTs				
WO ₃ -Ag	Óleo de Transformador	1 passo	-	-
Cu-TiO ₂	Água e Etileno glicol (60:40)	2 passos	6 h	-
SWCNTs-ZnO	Água e Etileno glicol (40:60)	2 passos	7 h	-

Fonte: Adaptado de SAJID e ALI (2018)

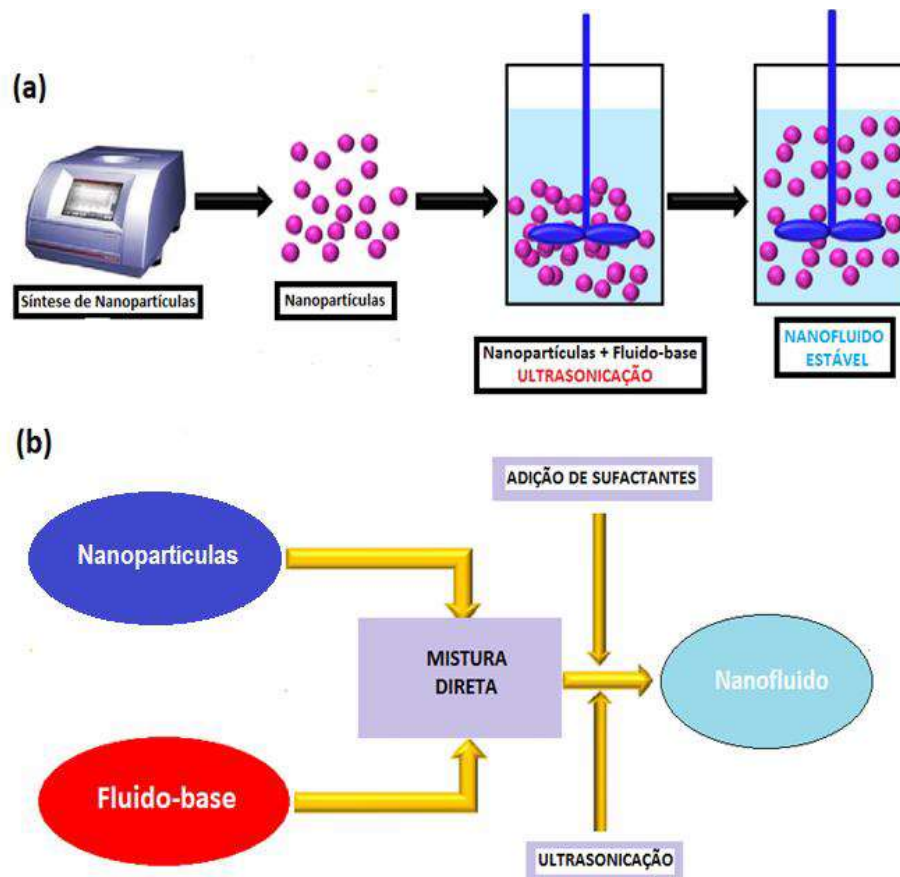
As desvantagens do método de preparação de nanofluidos híbridos de passo único estão associadas principalmente ao seu elevado custo, grau de complexidade e ainda a dificuldade de produção em larga escala.

2.1.2 O MÉTODO DE DOIS PASSOS

O método de dois passos, como é possível perceber da Tabela 2.1, é o mais frequentemente utilizado pelos pesquisadores em todo mundo em razão do seu baixo custo, simplicidade e capacidade de produção em larga escala. Neste método, os nanomateriais sólidos são obtidos inicialmente na forma de nano-pós seco, empregando variados processos mecânicos ou químicos de sinterização. A segunda etapa deste método compreende o processo de dispersão das nanopartículas sólidas no fluido-base (exemplo: água, etilenoglicol, mistura de água e etilenoglicol , óleos lubrificantes etc).

A dispersão poderá ser realizada utilizando-se uma ou mais técnicas combinadas de: (1) ultrassom por banho ou por sonda de imersão, (2) homogenizador de alta pressão, e (3) agitação magnética ou centrífuga. A Figura 2.5 ilustra a preparação de nanofluidos pelo método de dois passos: (a) nanofluido híbrido e (b) nanofluido simples.

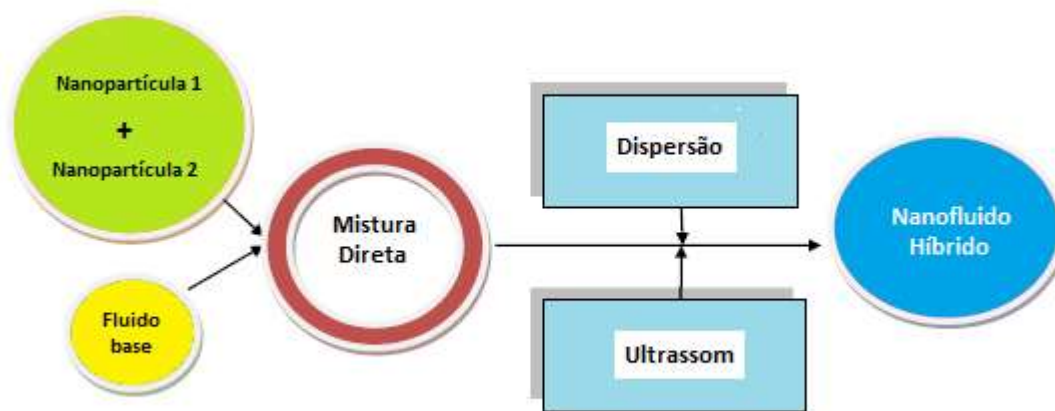
Figura 2.5 – Preparação de nanofluido simples pelo método de dois passos: (a) sinterização com micro-ondas e (b) mistura direta, surfactantes e ultrassonicação.



Fonte: Adaptado de ANGAYARKANNI e PHILIP (2015)

Neste caso, o primeiro passo corresponde à síntese das nanopartículas com auxílio de micro-ondas e o segundo passo compreende a mistura destas nanopartículas ao fluido-base, a dispersão e uso de ultrassom, obtendo como resultado final o nanofluido híbrido. Na Figura 2.6 tem-se representado as etapas do processo de preparação de nanofluido híbrido pelo método de dois passos.

Figura 2.6 – Preparação de nanofluido híbrido pelo método de dois passos: mistura direta, dispersão e ultrasom.



Fonte: Adaptado de GUPTA *et al* (2018)

2.1.3 CONCENTRAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

A concentração de nanopartículas sólidas dispersas em um nanofluido simples ou híbrido pode ser expressa por diferentes formas, Na maioria das publicações científicas a concentração é apresentada em porcentagem volumétrica ou mássica. As Equações 2.1, 2.2 e 2.3 regem a concentração das nanopartículas de um nanofluidos híbrido em base volumétrica, mássica ou gravimétrica, respectivamente.

$$\phi (\%) = \left[\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{nanopartícula\ 1} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{nanopartícula\ 2}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{nanopartícula\ 1} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{nanopartícula\ 2} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{fluido\ base}} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

$$\phi (\%) = \left[\frac{W_{nanopartícula\ 1} + W_{nanopartícula\ 2}}{W_{nanopartícula\ 1} + W_{nanopartícula\ 2} + W_{fluido-base}} \right] \times 100 \quad (2.2)$$

$$\phi (g/L) = \left[\frac{W_{nanopartícula\ 1} + W_{nanopartícula\ 2}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{fluido\ base}} \right] \quad (2.3)$$

Fonte: Adaptada de KAKAVANDI (2018), ESFE (2018), HOLANDA (2018) e DARDAN (2016)

Onde Φ é a concentração volumétrica [%], mássica [%] ou gravimétrica [g/L]; ρ é a densidade [g/cm³] e w é a massa do material [g]. A Tabela 2.2 mostra exemplos de nanofluidos híbridos com várias concentrações de nanopartículas.

Tabela 2.2 – Nanofluidos híbridos típicos

Autores	Nanofluidos	Faixa de temperatura (°C)	Concentração volumétrica (%)	Concentração mássica (wt%)
Hemmat Esfe et al. [24]	Cu-TiO ₂ /water-EG	30-60	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0	-
Suresh et al. [25]	Al ₂ O ₃ -Cu/water	40	0.1	-
Jana et al. [29]	CNT-CuNP/water and CNT-AuNP/water	25	CNT: 0.2, 0.3, 0.5, 0.8 AuNP: 1.5-2.5 CuNP: 0.05, 0.1, 0.2, 0.3	-
Ho et al. [30]	Al ₂ O ₃ -MEPCM/water	25-40	-	PCM: 2, 5, and 10 MEPCM: 3.7, 9.1, and 18.2 Al ₂ O ₃ : 2-10
Ho et al. [31]	Al ₂ O ₃ -MEPCM/water	<40	-	PCM: 2, 5, and 10 MEPCM: 2-10
Botha et al. [32]	Silver-silica/transformer oil	130	-	Silica: 0.07 to 4.4 Silver: 0.1 to 0.6
Suresh et al. [33]	Al ₂ O ₃ -Cu/water	-	0.1, 0.33, 0.75, 1, 2	-
Abbasi et al. [35]	MWCNT + γ -Al ₂ O ₃ /gum Arabic + water	60	0.1	-
Bhosale and Borse [36]	Al ₂ O ₃ -CuO/water	<40	0.25, 0.5 and 1	-
Madhesh et al. [37]	Cu-TiO ₂ /water	45	0.1 to 2.0	-
Hemmat Esfe et al. [39]	Ag-MgO/water	-	0 to 2	50:50
Yarmand et al. [40]	CNP-Ag/water	<45	-	0.02, 0.06 and 0.1
Afrand et al. [41]	SiO ₂ -MWCNT/engine oil (SAE40)	25-60	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75 and 1.0	-
Afrand et al. [41]	Fe ₃ O ₄ -Ag/EG	25-50	0.0375, 0.075, 0.15, 0.3, 0.6 and 1.2	-
Asadi and Asadi [42]	MWCNT-ZnO/engine oil	5-55	0.125, 0.25, 0.5, 0.75 and 1	-
Harandi et al. [44]	f-MWCNTs-Fe ₃ O ₄ /EG	25-50	0.1, 0.25, 0.45, 0.8, 1.25, 1.8 and 2.3	-
Soltani and Akbari [45]	MgO-MWCNT/EG	30-60	0.1, 0.2, 0.4, 0.8 and 1	-
Selvakumar and Suresh [50]	Al ₂ O ₃ -Cu/water	-	0.1	-
Baghbanzadeh et al. [52]	Silica-MWCNT/water	20	-	Hybrid 1: 80:20 Hybrid 2: 50:50
Han and Rhi [53]	Ag-Al ₂ O ₃ /water	1, 10, 20	0.005, 0.05, 0.1	-
Takabi and Shokouhmand [54]	Al ₂ O ₃ -Cu/water	-	0 to 2	-

Fonte: Adaptado de NABIL *et al.* (2017)

A Tabela 2.3 apresenta as nanopartículas de nanofluidos simples ou híbridos que foram utilizadas por vários pesquisadores da UFRN e o intervalo de concentração das nanopartículas.

A particularidade é a concentração das nanopartículas sólidas imersas no fluido-base que é expressa em unidades de grama por litro da solução coloidal (g/L).

Tabela 2.3 – Nanofluidos híbridos e simples utilizados por pesquisadores da UFRN

Pesquisador	Nanofluido	Fluido-base	Nanopartícula	Intervalo de Concentração (g/L)
HOLANDA (2018)	híbrido	Óleo POE	C-Al ₂ O ₃	0,1-2,0
AZEVEDO (2017)	simples	Óleo Mineral Óleo POE	In	0,3
SOUZA (2016)	simples	Óleo POE	MWCNTs	0,3-0,6
ALMEIDA (2015)	simples	Óleo Mineral	Al ₂ O ₃	0,1-0,5

Fonte: Elaborada pelo Autor

2.2 ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS

YU *et al.* (2017) fazem uma revisão examinando os recentes esforços e progressos na melhoria da estabilidade da dispersão de nanofluidos térmicos, tais como compreensão do comportamento de dispersão de nanofluidos, exemplos de nanofluidos à base de água e à base de óleo, estratégias para estabilizar os nanofluidos e técnicas de caracterização para o comportamento de dispersão de nanofluidos.

Eles também comentam que a fraca estabilidade de dispersão dos nanofluidos térmicos, tem sido considerada como uma questão que limita o seu desenvolvimento e aplicação prática. Finalmente, necessidades de pesquisa em andamento e possíveis soluções para os desafios de nanopartículas dispersas estavelmente são discutidas.

A revisão de ANGAYARKANNI e PHILIP (2015) apresenta os recentes progressos na pesquisa de nanofluidos a partir de uma perspectiva de transferência de calor. A ênfase principal do *review* são artigos sobre propriedades de nanofluidos, materiais com mudança de fase e nanofluidos híbridos.

Estudos avançados de preparação de nanofluidos por várias técnicas, diferentes métodos de estabilização, técnicas de medição da estabilidade, condutividade térmica e capacidade calorífica, além de mecanismos propostos de transporte de calor, modelos teóricos sobre condutividade térmica e fatores de influência, são também objetos de discussão neste artigo de revisão.

ABDULLAH *et al.* (2018) investigaram a estabilidade de nanopartículas de alumina (tamanho 50 nm) em mistura etanol-água com e sem dispersante. O sal de sódio do ácido poli-metacrílico (SPMAA) como dispersante foi usado nesta investigação. Altura de solução clara em relação ao tempo, fotografias de camadas de sedimentos e técnicas de potencial zeta foram utilizados para analisar o

comportamento de estabilidade do nanofluido. O efeito das proporções de mistura binária e o pH da dispersão foi investigado e discutido.

Os resultados mostraram que a sedimentação, o potencial zeta e técnicas fotográficas têm uma grande correspondência entre si. SPMAA tem sido usado como dispersante em baixa concentração (0,03 ml) e tem um impacto negativo na estabilidade dos nanofluidos. O ponto isoelétrico da alumina de pH 7, com dispersante foi deslocado para a região de pH 4,5.

Os nanofluidos são misturas bifásicas classificadas como soluções coloidais ou colóides, uma vez que as partículas sólidas em suspensão no fluido-base (meio líquido) apresentam dimensões nanométricas, normalmente da ordem de 1 a 100 nanômetros (nm).

A forte tendência de aglomeração das nanopartículas no meio líquido ocorre em razão das forças de atração entre elas, sendo um fenômeno natural e altamente indesejável, pois promove a sedimentação e o fracionamento da mistura bifásica, com alterações das propriedades termofísicas e do desempenho termo-reológico dos nanofluidos.

O método de dois passos apesar de simples apresenta uma forte tendência de aglomeração das nanopartículas sólidas em razão da elevada área superficial específica e energia superficial atribuída principalmente às forças de atração (ou coesão) de *Van der Waals*.

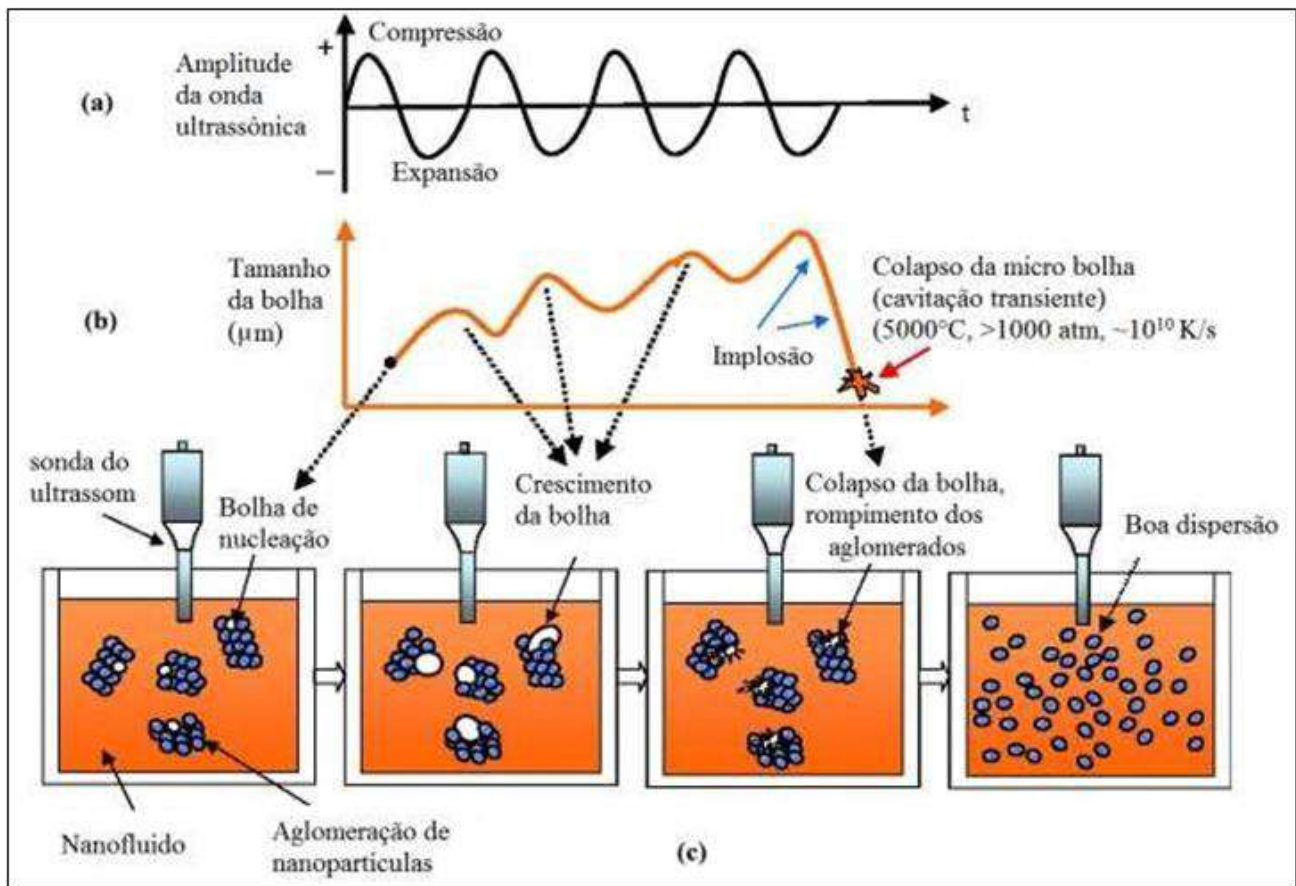
2.2.1 MECANISMOS DE MELHORIA DA ESTABILIDADE

Para conferir estabilidade e retardar o fracionamento do nanofluido, em razão da tendência de ocorrência dos eventos de aglomeração e sedimentação das nanopartículas dispersas no fluido-base, e seu efeito colateral inevitável de redução das propriedades termofísicas do nanofluido, muitos pesquisadores lançam mão de alguns recursos para melhorar a estabilidade dos nanofluidos. A estabilidade de um nanofluido poderá ser alcançada mediante o uso de uma ou mais técnicas químicas ou físicas de: (1) homogeneização de alta pressão, (2) mistura por cisalhamento ou centrifugação, (3) Ultrassom por banho ou por imersão, (4) Ajuste do *PH*, (5) uso de surfactantes ou dispersantes entre outros.

Segundo DE OLIVEIRA (2018) as técnicas de agitação mecânica por ultrassonicação, homogeneização a alta pressão ou ainda moagem de alta energia são eficientes no processo de desfragmentação das nanopartículas imersas em um líquido, uma vez que não modificam as dimensões originais das nanopartículas, apenas colapsa o “*cluster*” de partículas que apresenta um tamanho maior e causa a sedimentação. A Figura 2.7 ilustra o colapso de bolhas de cavitação produzidas pela ultrassonicação

de imersão e os eventos de nucleação, crescimento e implosão da bolha produzindo o colapso do “cluster” e desfragmentação das nanopartículas no fluido-base do nanofluido.

Figura 2.7 - Ultrassom de imersão: nucleação, crescimento, colapso e implosão de bolhas de cavitação com desfragmentação de nanopartículas do nanofluido.



Fonte: LAN *et al.* (2004) *apud* DE OLIVEIRA (2018)

A pesquisadora comenta ainda que o ultrassom por imersão é uma técnica comumente utilizada na síntese de nanofluidos e que produz nano-suspensões uniformes e estáveis. No entanto, a estabilidade dos nanofluidos é influenciada pela frequência de sonicação e o tempo de sonicação. Ambos os parâmetros são diretamente proporcionais à melhora da estabilidade da nano-suspensão.

ILYAS *et al.* (2017) relatam que a temperatura do nanofluido durante o processo de ultrassonicação aumenta, como consequência da absorção de energia das ondas ultrassônicas pelas nanopartículas e pelas moléculas do fluido-base, aumentando assim sua energia cinética.

Deve-se dispor de meios capazes de refrigerar de forma contínua e dissipar o calor gerado pela amostra de nanofluido que estiver sendo sonicada, uma vez que o excesso de calor intensifica os efeitos de aglomeração das nanopartículas.

Os sonificadores de ultrassom por banho são menos eficazes quando comparados com os do tipo sonda de imersão e ainda demandam muito mais tempo para desaglomeração das nanopartículas dos nanofluidos, pois a passagem das ondas ultrassônicas é fortemente dificultada pela parede de vidro do recipiente e com isso não atingem de forma integral a amostra de nanofluido a ser sonicada, diminuindo dessa forma a eficácia do processo.

2.2.2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE

A qualidade de um nanofluido está intimamente associada ao conceito de estabilidade que é uma das características mais importantes que o nanofluido deve possuir, uma vez que esta condição é essencial para evitar o fracionamento da solução bifásica causado pela aglomeração e sedimentação das nanopartículas no meio líquido, preservando os requisitos de propriedades termofísicas desejadas para determinada aplicação.

O estudo da estabilidade dos nanofluidos consiste em uma etapa fundamental de sua caracterização. A sedimentação é um dos maiores problemas encontrados em nanofluidos.

Atualmente estão disponíveis diversas técnicas de avaliação do processo de sedimentação de nanofluidos, entre elas tem-se: (a) espectroscopia UV-vis, (b) inspeção visual com fotografias cronológica da sedimentação, (c) Potencial zeta e (d) imagens de microscopia eletrônica de transmissão e varredura.

Na atualidade, o método mais simples e popular que tem sido utilizado para avaliação da estabilidade de nanofluidos ou de soluções coloidais entre eles é o método da sedimentação por inspeção visual.

A literatura especializada tem destacado com muita ênfase a necessidade de se estabelecer uma padronização da metodologia para avaliar a estabilidade dos nanofluidos, uma vez que o método utilizado para avaliar a estabilidade de um certo tipo de nanofluido pode não ser o mais adequado para outro nanofluido. tem dificultado uma comparação do desempenho de variados nanofluidos.

2.2.2.1 O MÉTODO DA SEDIMENTAÇÃO

A estabilidade de um nanofluido pode ser avaliada pelo método de sedimentação que é o mais simples e seguramente de menor custo entre todos os métodos disponíveis.

As partículas em escala nanométricas (1-100 nm) dispersas no fluido-base têm uma forte tendência de aglomeração gerando o aumento do diâmetro médio que favorece a ação da gravidade e por consequência a sedimentação das partículas sólidas do meio líquido.

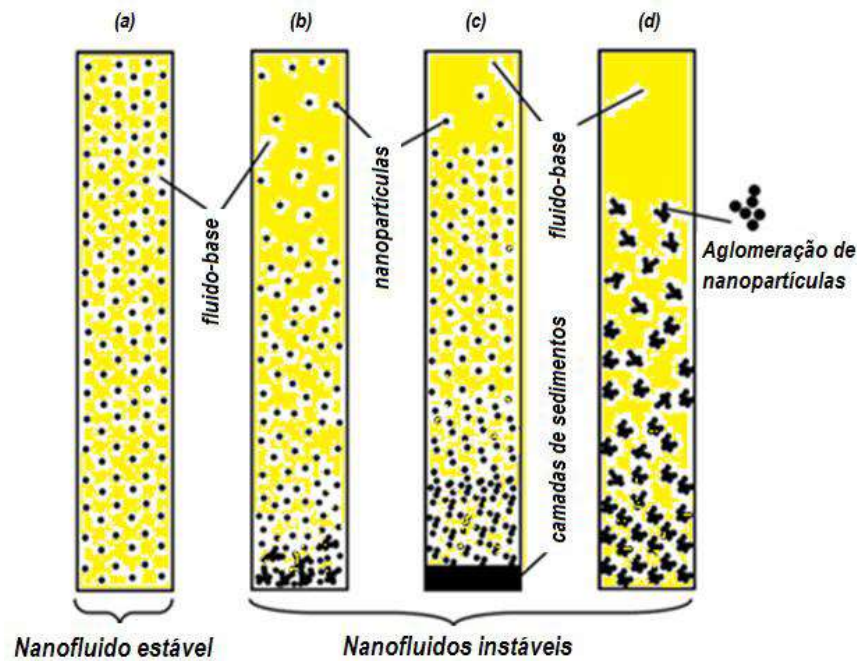
Segundo ILYAS *et al.* (2017) são três tipos de sedimentação predominam em nanofluidos: (a) a sedimentação dispersa, (b) a sedimentação floculada e (c) a sedimentação mista.

A sedimentação dispersa é característica de nanofluidos contendo baixa concentração de nanopartículas onde o nível da sedimentação tem crescimento de baixo para cima.

A sedimentação de tipo floculado predomina quando a concentração de nanopartículas no meio líquido excede a concentração crítica (equivalente a 1%). Neste caso, a altura do sedimento diminui de cima para baixo e a solução fica mais clara a partir do topo.

Na sedimentação mista os grandes aglomerados de nanopartículas no meio líquido se precipitam formando múltiplas camadas. O aspecto de multicamadas é causado por diferentes tamanhos de aglomerados que se estabelecem em diferentes velocidades de precipitação.

ILYAS *et al.*, (2017) comentam ainda que o nível de sedimentos das nanopartículas que se precipitam em um nanofluido podem ser registrados ao longo do tempo por meio de uma câmera de alta velocidade, permitindo determinar as velocidades de sedimentação das nanopartículas ou aglomerados de nanopartículas. A Figura. 2.8 mostra a sedimentação típica que pode ocorrer em nanofluidos do tipo estáveis e instáveis.

Figura 2.8 – Sedimentação típica das nanopartículas em nanofluidos estáveis e instáveis.

Fonte: Adaptado de ILYAS *et al.*, (2017)

2.3 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Nesta seção são abordadas diferentes características das propriedades termofísicas de condutividade térmica e viscosidade dinâmica e de lubricidade pelo método tribológico do HFRR que são o foco principal desta investigação.

2.3.1 A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

É a propriedade de maior importância nas pesquisas que envolvem o tema nanofluidos. Ela contribui substancialmente com a eficiência dos processos de transferência de calor em permutadores de calor, e por essas razões, seguramente é o tema mais exaustivamente abordado no desenvolvimento de novos produtos e aplicação da tecnologia dos nanofluidos.

ALAWI *et al.* (2014) elaboraram um artigo de *review* abordando diversos tópicos sobre nanorefrigerantes. Os efeitos dos nanolubrificantes sobre os fenômenos de ebulição transferência de calor são apresentados. Com base nos resultados disponíveis na literatura, verificaram que os nanorefrigerantes têm uma condutividade térmica muito mais alta e fortemente dependente da temperatura com concentrações de nanopartículas muito baixas, comparativamente ao refrigerante

convencional. Isso pode ser considerado como um dos principais parâmetros para melhorar o desempenho dos sistemas de refrigeração e ar condicionado.

O artigo de revisão de KUMAR (2017) apresenta o progresso recente da pesquisa sobre a condutividade térmica de nanofluidos e uma visão dos estudos experimentais e numéricos sobre diferentes nanofluidos. Neste artigo também são discutidos vários fatores que afetam a condutividade térmica, incluindo tipos de nanopartículas, fração de volume sólido, diferentes fluidos-base, temperatura, tamanho de partícula, pH, sonicação, surfactantes e outros mecanismos do realce térmico da condutibilidade térmica de nanofluidos.

Além disso, síntese, métodos de preparação, condutividade térmica e os desafios dos nanofluidos híbridos também são discutidos. Existem muitos resultados contraditórios encontrados na literatura sobre a influência de parâmetros efetivos nas propriedades termofísicas. Foi observado que a condutividade térmica de nanofluidos é afetada por muitos parâmetros. Portanto, este artigo é útil para pesquisadores uma vez que traz uma abordagem precisa e uma ampla gama de estudos neste campo.

Nanofluidos híbridos podem exibir melhores características de condutividade térmica do que os nanofluidos simples. No entanto, os resultados indicam que a seleção de nanopartículas híbridas é um grande desafio para a preparação de nanofluidos estáveis. Dessa forma, o conhecimento e a compreensão dos parâmetros que influenciam a estabilidade dos nanofluidos, são indispensáveis para o desenvolvimento de nanofluidos híbridos com melhor condutividade térmica.

GUPTA *et al.* (2017) fazem um artigo de revisão com resultados importantes em relação à melhoria nas propriedades termofísicas de nanofluidos e a influência de parâmetros importantes como nanopartículas (carga, material, tamanho e forma), tipo de fluido-base, temperatura, aditivos e valor de pH. Também mostram as aplicações de nanofluidos com foco particular nas vantagens do uso de nanofluidos em coletores solares e como fluidos refrigerantes em trocadores de calor. Por fim, o artigo identifica várias possibilidades e oportunidades de aplicação de nanofluidos para futuras pesquisas.

TAWFIK (2017) comenta que em muitas aplicações, há uma necessidade crítica de melhorar a baixa condutividade térmica dos fluidos convencionais a fim de desenvolver fluidos de transferência de calor eficientes. Este requisito pode ser atendido através da dispersão de partículas nanométricas em um meio líquido, como água, etilenoglicol, óleo etc.

No entanto, os nanofluidos têm o potencial de contribuir em várias aplicações práticas, incluindo a solar térmica, transporte, resfriamento eletrônico, aplicações médicas, de detergência e militares. Uma breve visão geral da evolução do uso de nanofluidos em algumas aplicações foi apresentada. O artigo destaca ainda que há uma necessidade crítica de mais estudos fundamentais e aplicações desses estudos de nanofluidos, a fim de compreender os mecanismos físicos do uso de nanofluidos, bem como explorar diferentes aspectos que envolvem as aplicações de nanofluidos.

Na Figura 2.9 de TAWFIK (2017) são mostrados os principais fatores que influenciam ou controlam a condutividade térmica dos nanofluidos: (i) o método de preparação, que pode ser de um ou dois passos, (ii) a concentração das nanopartículas sólidas imersas no fluido-base que normalmente incrementa essa propriedade com o aumento da concentração, (iii) O tamanho das nanopartículas com efeitos na área superficial e estabilidade das nanopartículas, favorecendo as trocas térmicas quanto menor são suas dimensões (iv) a forma das nanopartículas (v) a condutividade térmica das nanopartículas, quanto maior melhor, pois intensificam essa propriedade no nanofluido, (vi) o tipo de fluido base e (vii) a temperatura do nanofluido.

Figura 2.9 – Fatores que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos



Fonte: Adaptado de TAWFIK (2017)

A Figura 2.10 apresenta outros parâmetros que influenciam e controlam a condutividade térmica dos nanofluidos: (viii) clusterização (aglomeração), (ix) acidez (PH) e (x) aditivos.

Figura 2.10 – Fatores que controlam a condutividade térmica do nanofluido

Partícula	Condutividade Térmica (W/mK)
Al ₂ O ₃	40
CuO	76.5
Fe ₂ O ₃	6
MgO	54.9
SiO ₂	1.34–1.38
TiO ₂	8.4
ZnO	29
Ag	429
Al	238–273
Au	310
Cu	401
Fe	75–80
MWCNT	2000–3000
C ₆₀ –C ₇₀ (Fullerene)	0.4
SiC	490

Fonte: Adaptado de TAWFIK (2017)

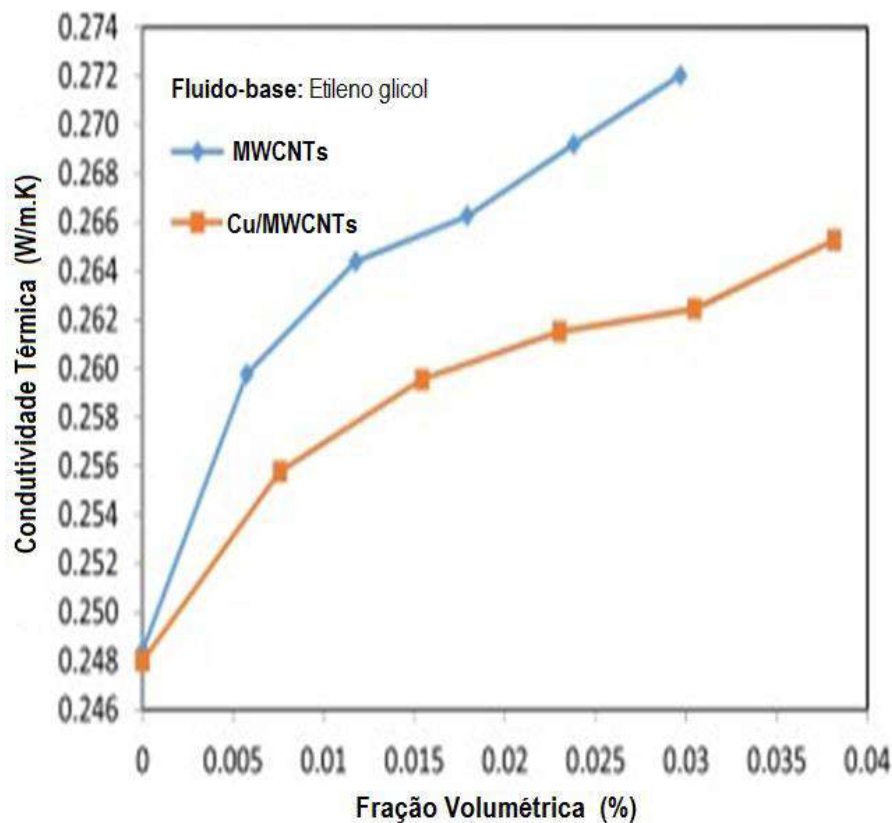
Os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) têm os valores mais elevados dessa propriedade entre 2000-3000 [W/m.K], A alumina (Al₂O₃) tem condutividade térmica moderada de 40 [W/m.K] e uma das mais altas entre os óxidos.

A Figura 2.11 extraída de LEONG, K.L. *et al.* (2017) compara os gráficos de condutividade térmica de nanofluido simples composto de nanotubo de carbono de paredes múltiplas em etileno glicol (MWCNTs/EG) com o nanofluido híbrido formado por nanopartículas de cobre e nanotubos de carbono de paredes múltiplas tendo com fluido-base também o etileno glicol (Cu-MWCNTs/EG).

YARMAND *et al.* (2015) apresentaram o nanofluido híbrido composto de carbono e grafeno, para investigar suas propriedades termofísicas. Eles indicaram que a condutividade térmica dos nanofluidos melhorou com o incremento da concentração em massa e temperatura. No entanto, a condutividade térmica dos nanofluidos não foi linear tanto para porcentagem de peso quanto para temperatura.

Quatro possíveis fatores são apontados responsáveis pelo aumento da condutividade térmica dos nanofluidos, como movimento browniano de nanopartículas, camadas líquidas na interface de partículas, natureza do transporte de calor em nanopartículas e fenômenos de agrupamento.

Figura 2.11 – Condutividade térmica de nanofluido simples e híbrido com nanopartículas de cobre e nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

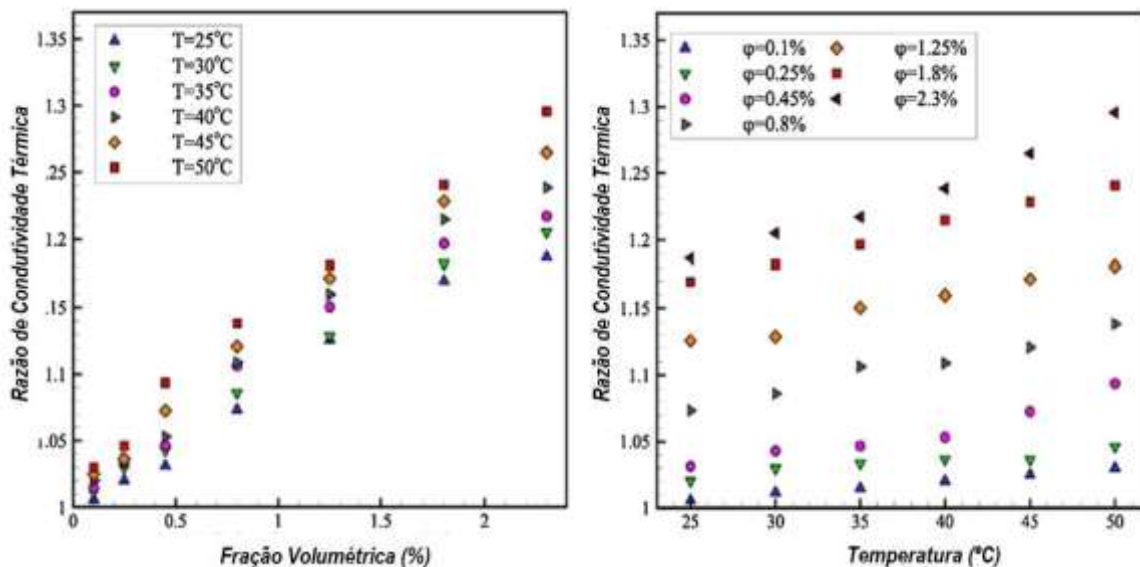


Fonte: Adaptado de LEONG, K.L. *et al.* (2017)

Os pesquisadores relatam o incremento natural da condutividade térmica com aumento da concentração volumétrica de nanopartículas dos nanofluidos e também a menor intensidade da condutividade térmica do nanofluido híbrido em relação ao simples devido a menor condutividade térmica do cobre comparativamente ao nanotubo de carbono.

A Figura 2.12 apresenta a razão de condutividade térmica de nanofluido híbrido para diferentes concentrações volumétricas das nanopartículas sólidas imersas no meio líquido e também em função da temperatura do nanofluido.

Figura 2.12 - Variação da condutividade térmica de nanofluido híbrido em função da concentração volumétrica e da temperatura.



Fonte: Adaptado de HAMZAH *et al.* (2017)

2.3.2 VISCOSIDADE DINÂMICA

A viscosidade é outra propriedade muito importante dos nanofluidos, especialmente em aplicações térmicas envolvendo transferência de calor e escoamento do fluido.

Ela exerce forte influência no processo de escoamento dos fluidos de transferência de calor, e o aumento da viscosidade dinâmica dos fluidos induz a uma elevação da potência de bombeamento para o transporte do fluido.

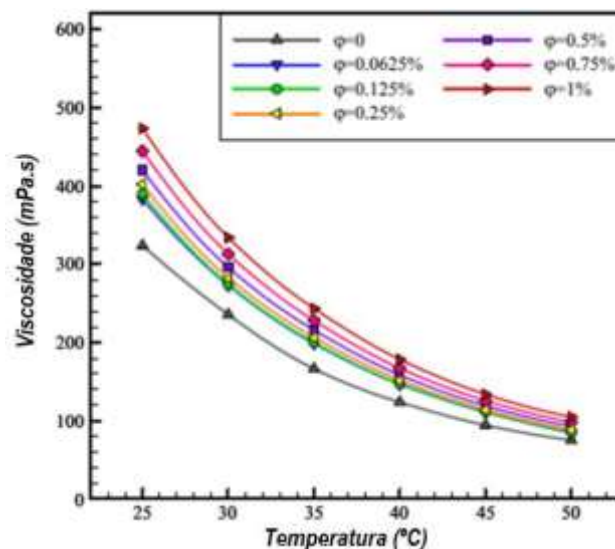
Por essas razões, um percentual bastante significativo das pesquisas com nanofluidos são direcionados ao estudo com foco nesta propriedade.

A Figura 2.13 mostra os principais parâmetros que exercem influencia na viscosidade dos nanofluidos: (1) temperatura do nanofluido, (2) taxa de cisalhamento do nanofluido, (3) concentração volumétrica ou mássica das nanopartículas imersas no fluido-base e (4) morfologia das nanopartículas.

Figura 2.13 – Fatores que afetam a viscosidade dos nanofluidos.

Fonte: Adaptado de GUPTA (2017)

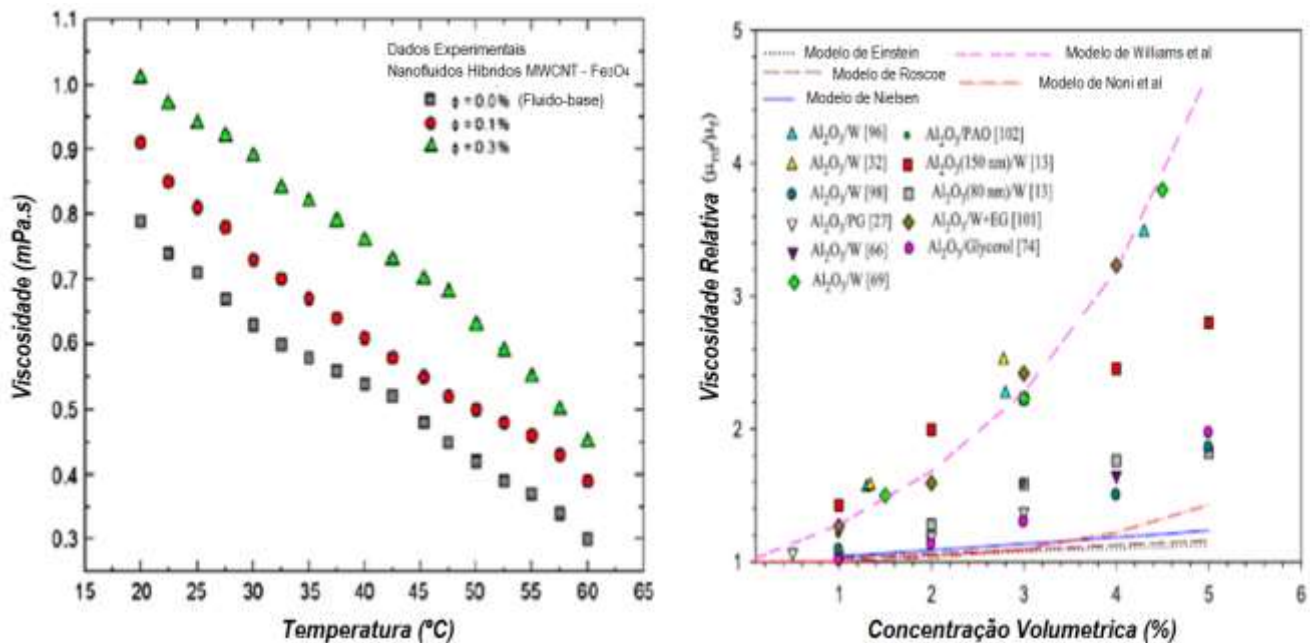
HAMZAH *et al.* (2017) mostraram na Figura 2.14 a relação da viscosidade dinâmica com relação à variação da temperatura e da fração de volume sólido do nanofluido híbrido MWCNT-Al₂O₃/SAE40. De acordo com os resultados obtidos pelos pesquisadores, é observada claramente que a sensibilidade da viscosidade é muito mais acentuada com a temperatura do que com relação à fração volumétrica de nanopartículas sólidas dispersas no nanofluido.

Figura 2.14 – Curvas de viscosidade do nanofluido híbrido MWCNT-Al₂O₃/SAE40 em diferentes concentrações de 0,0625-1% *versus* temperatura.

Fonte: Adaptado de HAMZAH *et al.* (2017)

A Figura 2.15 por sua vez, apresenta graficamente alguns modelos empíricos e teóricos da viscosidade dinâmica em função da concentração volumétrica para nanofluidos híbridos contendo nano-pós de MWCNTs-Fe₃O₄ e de nanofluidos simples contendo nanopartículas de alumina (Al₂O₃), dispersas em fluidos-base tais como água, glicerol, etileno-glicol, propileno-glicol e óleo PAO.

Figura 2.15 - Viscosidade *versus* temperatura ou concentração do nanofluido híbrido



Fonte: Adaptado de DARDAN *et al.* (2017)

2.4 TRIBOLOGIA

USSA (2016) comenta em sua tese de doutorado que com o advento da nanotecnologia foi possível a síntese de nanopartículas de diferentes materiais que podem ser usados em diferentes aplicações.

Na tribologia, pesquisadores exploraram a possibilidade de usar nanopartículas como aditivos lubrificantes para reduzir o atrito e desgaste. Primeiro, acreditava-se que as nanopartículas poderiam atuar como pequenos rolamentos de esferas entre as superfícies deslizantes. Como consequência, nanopartículas e nanotubos à base de carbono (NT), bem como outros nanocompostos químicos como Cu, ZnO, TiO₂, NiMoO₂S₂, Zn, entre outros têm sido objeto de estudos nas últimas décadas.

2.4.1 PRINCÍPIOS DO ATRITO E DESGASTE

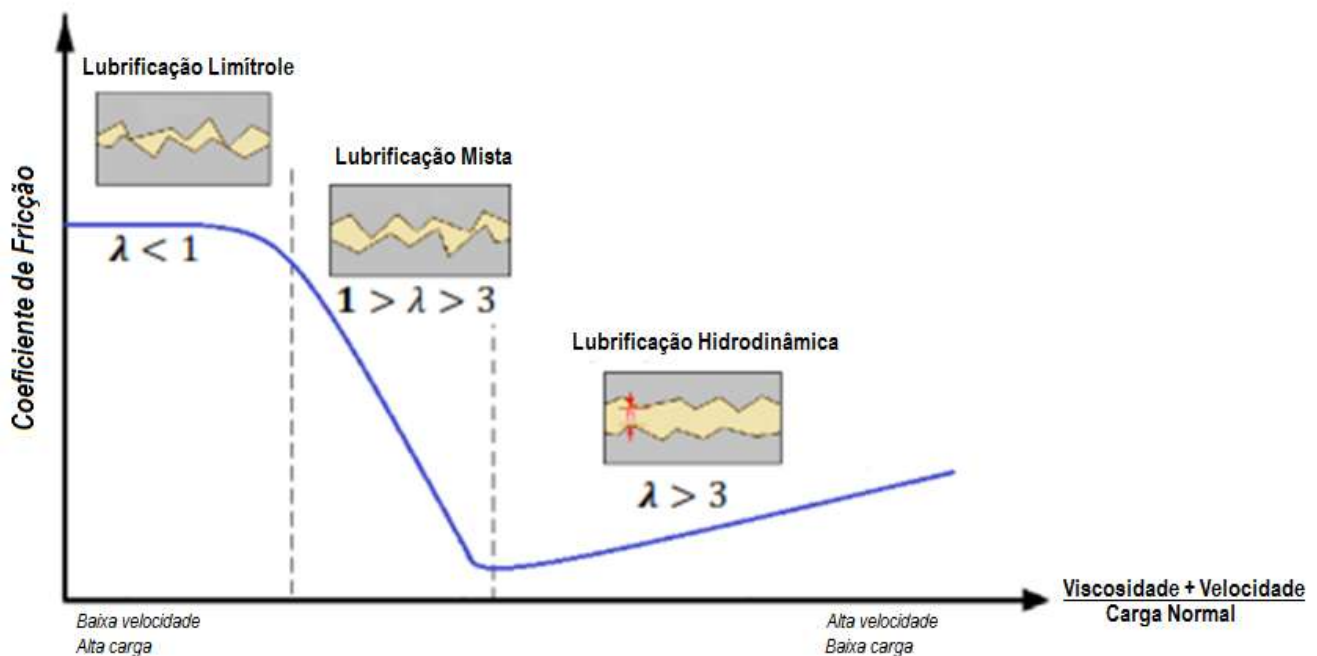
A pesquisadora USSA (2016), descreve que o atrito é a resistência encontrada quando um corpo se move tangencialmente sobre outro com que está em contato. A força de atrito sempre age na direção oposta ao deslocamento entre as superfícies de contato e é uma função da carga normal do contato.

Ela é também a principal causa de desgaste e dissipação de energia. O atrito entre superfícies móveis pode ser reduzido pelo uso de lubrificantes. Os lubrificantes dos compressores da indústria de refrigeração são lubrificantes líquidos compostos principalmente de óleo base e um pacote de aditivos. Segundo USSA (2016), na lubrificação líquida três regimes diferentes podem ser identificados: (1) filme completo ou hidrodinâmico, (2) lubrificação mista e (3) lubrificação limítrofe. Estes regimes são baseados no parâmetro lambda ou espessura específica do filme, que é a relação entre a espessura do filme do fluido e a rugosidade da superfície, conforme definido pela equação 2.4.

$$\lambda = \frac{h_{min}}{[(Rq_1)^2 + (Rq_2)^2]^{1/2}} \quad (2.4)$$

Onde λ é a espessura do filme hidrodinâmico para superfícies lisas; Rq_1 e Rq_2 são os valores de rugosidade das duas superfícies de rolamento. Todos os regimes de lubrificação e sua relação com o parâmetro lambda são ilustrados na curva de Stribeck na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Curva de *Stribeck* mostrando os diferentes regimes de lubrificação como uma função da espessura do filme, a viscosidade e carga normal.



Fonte: Adaptado de USSA (2016)

O regime de filme completo ou lubrificação hidrodinâmica (HD) ocorre quando as duas superfícies em movimento são completamente separadas pelo filme de fluido e significa que o filme lubrificante é mais espesso do que a altura das asperezas.

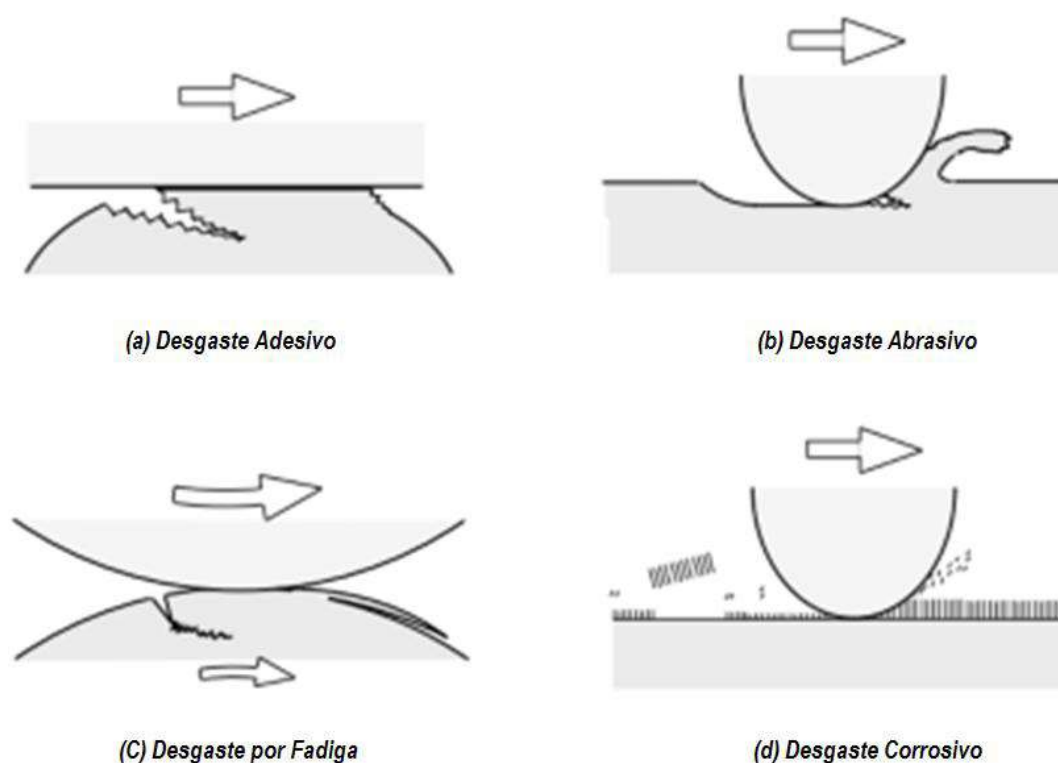
Por outro lado, a lubrificação limítrofe (BL) ocorre quando as duas superfícies estão principalmente em contato umas com as outras, mesmo com a presença mínima do filme lubrificante.

A lubrificação mista (ML) é um cruzamento entre a lubrificação limítrofe e a película completa, em que a maior parte as superfícies são separadas, mas as asperezas estão em contato.

Desgaste é definido como a remoção ou deslocamento de material de um corpo quando sujeito a contato e movimento relativo com outro, em outras palavras, quando sujeito a atrito. Existem vários tipos de desgaste. No entanto, os mais representativos e importantes são: (a) adesivo, (b) abrasivo, (c) por fadiga e (d) corrosivo.

Na realidade, o desgaste normalmente não ocorre através de um único modo de desgaste, mas através de uma combinação deles. Os principais mecanismos de desgaste são ilustradas na Figura 2.17

Figura 2.17 – Mecanismos de desgaste: (a) adesivo, (b) abrasivo, (c) por fadiga e (d) corrosivo.



Fonte: Adaptado de USSA (2016)

VENKATARAMANA *et al.* (2016) relatam que a lubrificação com nanofluidos é uma nova abordagem para melhorar a eficiência energética das interfaces deslizantes, o que é útil para reduzir o atrito e o desgaste dos elementos da máquinas. Eles estudaram a aditivação de óleo POE com nanopartículas de óxidos de estanho (SnO₂) de 25 nm e concentração de 0,03 mg/mL, que apresentaram redução significativa no coeficiente de atrito e desgaste de até 38 e 42%, respectivamente, em comparação

com óleo POE puro. Estes pesquisadores são ainda categóricos em afirmar que a eficiência da lubrificação depende do tamanho das NPs, da estabilidade da dispersão e da concentração.

ALI *et al.* (2018) investigaram a economia de combustível em motores a gasolina usando nanolubrificante híbrido com nanopartículas de Al₂O₃/TiO₂. O consumo de combustível foi reduzido em 4 litros por km e a potencia de fricção reduzida entre 5-7%.

ALVES *et al.* (2018) em pesquisa experimental com óleo PAO aditivado com nanopartículas de óxidos de cobre (CuO) atestam ser possível a redução do coeficiente de atrito e do desgaste em condições de lubrificação limítrofe, usando estes nanomateriais.

RAJENDHRAN *et al.* (2018) em estudo experimental avaliaram os efeitos da adição de nanopartículas MoS₂ e de Ni nas propriedades termofísicas de óleo de engrenagem SAE 75W. As características termofísicas e tribológicas obtidas revelaram que a interação sinérgica das nanofolhas de Ni e MoS₂ tem melhor dispersibilidade e aditivo lubrificante mais adequado para condições de extrema extrema pressão.

ALI *et al.* (2018) afirmam que o atrito e desgaste das superfícies são a principal causa da dissipação de energia nos motores dos automóveis. Eles utilizaram nanolubrificante de grafeno (Gr) para poupar energia e reduzir as emissões de escape. Propriedades anti-fricção e antidesgaste de nanolubrificantes aditivados com Gr foram avaliados usando tribômetro baseado em ASTM G181. Os testes em dinamômetro AVL mostraram uma melhora do desempenho com redução das propriedades anti-fricção e antidesgaste em 29–35% e 22–29%, respectivamente. A lubrificação do motor usando nanolubrificante de Gr revelou ainda redução da massa de combustível consumida em 17% com simulação de carga na estrada durante o teste. Além disso, as emissões de escape (CO, CO₂, HC e NO_x) diminuíram em 2,79–5,42%, em comparação com o óleo de referência.

DAI *et al.* (2016) revisaram os efeitos das nanopartículas no desempenho tribológico da lubrificação com óleo. Os parâmetros químicos, físicos e morfológicos das nanopartículas foram estudados e comparados estatisticamente. Os mecanismos dos nanolubrificantes foram discutidos através de dados coletados na literatura.

LAAD e JATTI (2018) investigaram o comportamento tribológico da adição de nanopartículas de óxido de titânio (TiO₂) em óleo de motor multi-grade de base mineral. Todos os testes foram realizados sob carga variável e concentrações variáveis de nanopartículas em óleo lubrificante. Os ensaios de atrito e desgaste foram realizados usando triboteste do tipo pino-disco. Os resultados revelam que as

nanopartículas de TiO₂ no óleo do motor reduz significativamente o atrito e a taxa de desgaste e, portanto, melhora as propriedades lubrificantes do óleo do motor. A análise de dispersão de nanopartículas de TiO₂ em lubrificantes óleo usando espectrômetro UV confirma que as nanopartículas de TiO₂ possuem boa estabilidade e solubilidade em lubrificante e melhorar as propriedades lubrificantes do óleo do motor.

ESFE e SARLAK (2017) examinaram o comportamento reológico do nano-lubrificante híbrido CuO-MWCNT (85% 15%) / 10W-40 - na faixa de temperatura de 5 a 55 ° C e a fração de volume sólido de 0,05 a 1% para uso em motores de combustão interna. De acordo com dados experimentais, aumentando a fração de volume sólido do nanolubrificante, a viscosidade aumenta em comparação com lubrificante puro, de modo que a quantidade máxima de elevação dinâmica da viscosidade ocorre na fração de volume sólido de 1% e é de 43,52%. Finalmente, uma correlação matemática com o segundo precisão da ordem de 0,9846 foi apresentada para prever a viscosidade dinâmica do nanolubrificante, que teve correspondência aceitável com dados experimentais.

SHARIF *et al.* (2018) fazem revisão sobre mecanismos de melhoria de sistema de refrigeração por compressão de vapor (SRCV) usando nanorefrigerantes e nanolubrificantes. O aumento da transferência de calor, o refinamento de característica da mistura refrigerante-óleo, e o aprimoramento das propriedades tribológicas estão entre os principais mecanismos que afetam o desempenho do SRCV. Os parâmetros de desempenho do SRCV, como o trabalho do compressor e COP do sistema de refrigeração usando nanorefrigerantes e nanolubrificantes foram discutidos para relacionar mecanismos com desempenho geral do sistema.

Os resultados mostraram que a utilização de nanorefrigerantes e nanolubrificantes no SRCV aumentou os coeficientes de transferência de calor de 12 para 101% e o aprimoramento da condutividade para até 4%. A solubilidade e miscibilidade da mistura refrigerante-óleo aditivada com nanopartículas aumentaram até 12%, embora alguns outros pesquisadores tenham relatado que se mantiveram inalterados. Os nanolubrificantes apresentaram melhores características tribológicas, com redução de 32% e 13% do coeficiente de atrito. e taxa de desgaste, respectivamente. O efeito dos nanorefrigerantes e nanolubrificantes na transferência de calor, mistura de óleo refrigerante e tribologia aumentaram o desempenho geral do VCRS com 11% de redução do trabalho do compressor e 24% de aumento de COP.

DINESH *et al.* (2016) realizaram estudo experimental com óleo de motor SAE 20W40 aditivado com nanotubos de carbono de paredes múltiplas MWCNTs e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) com

fração volumétrica de 0,005% e 0,02%, respectivamente e dispersos juntamente com o surfactante Goma Arábico. Propriedades tribológicas tais como resistência ao desgaste, coeficiente de atrito e propriedades termo-físicas como condutividade térmica, viscosidade, ponto de fulgor do nanolubrificante resultante foram avaliadas e foram comparadas com as do óleo de motor simples. Os resultados mostram que o melhoramento das propriedades do nanolubrificante são fortemente dependentes da dispersão das nanopartículas no fluido-base.

AKBULUT (2012) afirma que com o advento da nanotecnologia, a pesquisa sobre lubrificantes e aditivos para lubrificantes experimentou uma mudança de paradigma. Em vez de materiais tradicionais, novos nanomateriais e nanopartículas foram recentemente investigados como lubrificantes ou aditivos lubrificantes devido às suas propriedades incomuns.

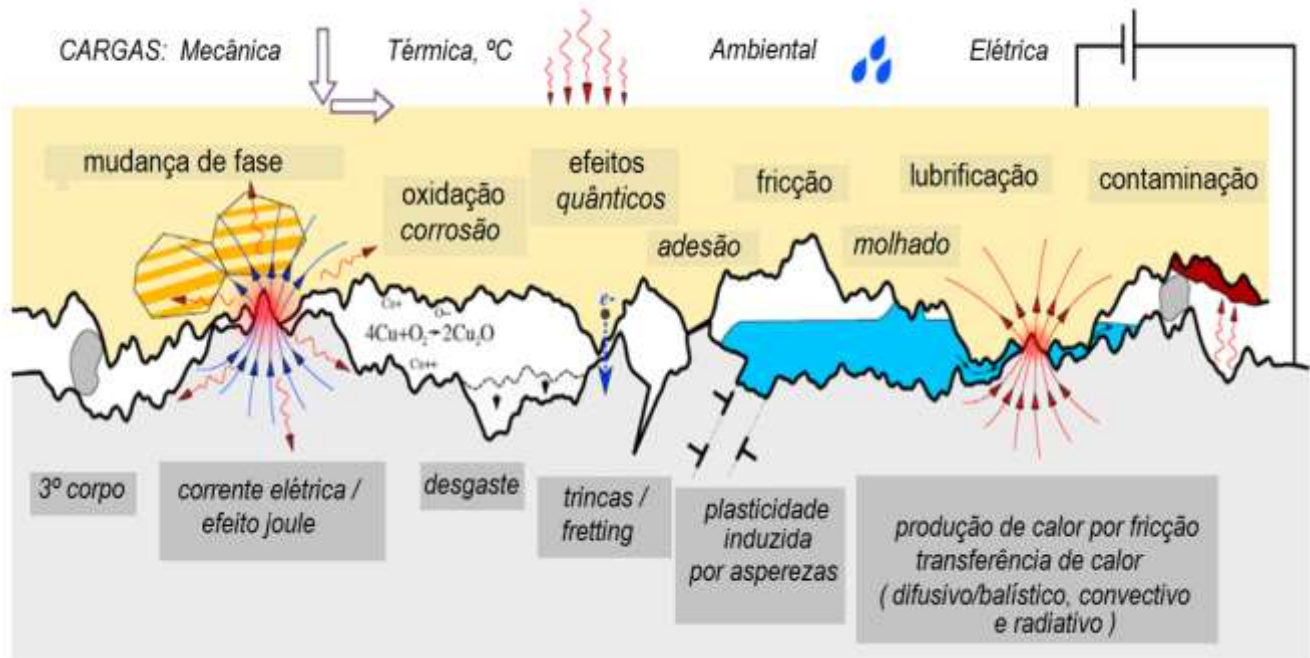
O pesquisador também comenta que existem vários tipos diferentes de nanomateriais com propriedades de atrito e desgaste potencialmente interessantes.

O artigo científico discute ainda a questão-chave: que tipos de nanopartículas agem como lubrificantes melhores e por quê?

OLIVEIRA *et al.* (2016) testaram um nanolubrificante constituído de óleo mineral e nanopartículas de grafite, de raio médio variando de 400 nm a 450 nm e para tanto, as nanopartículas foram caracterizadas quanto à densidade, morfologia, área superficial, porosidade, teor de humidade e distribuição de tamanho de partícula. Em seguida, amostras de nanolubrificante modificado com grafite foram formuladas e a incorporação das nanopartículas em óleo base se deu por meio da dispersão de alta energia (ultraturrax). As amostras foram então caracterizadas quanto à sua viscosidade e estabilidade térmica.

VAKIS *et al.* (2018), com base no resultado de um workshop do Centro de Lorentz, publicaram um *review* com os mais recentes avanços na área de tribologia envolvendo vários fenômenos físicos, químicos e mecânicos em diferentes escalas. Neste contexto, investigaram a natureza multifísica das interações no tribo-sistema da Figura 2.18, aonde os seguintes tipos de fenômenos podem ocorrer na interface tribológica ou em sua vizinhança imediata: mecânica (sólida e fluida), térmica, eletromagnética, metalúrgica, quântica, entre outras.

Figura 2.18 – Esquema representando a natureza multifísica das interações tribológicas: dois sólidos diferentes com superfícies ásperas e microestruturas materiais relevantes são colocados em contato mecânico e expostos a várias cargas: mecânica, térmica, elétrica e ambiental.



Fonte: Adaptado de VAKIS *et al.* (2018)

VAKIS *et al.* (2018) descrevem, com muita riqueza de detalhes, a natureza multifísica das interações tribológicas da Figura 2.18 e que são apresentadas de forma sintética a seguir:

- ✓ Os fenômenos mecânicos podem se referir à deformação mecânica de sólidos e sua interação de contato, incluindo aderência e fricção. O processo de remoção de material ou deterioração da superfície (microfissuração, desgaste abrasivo e adesivo) também pode ser incluído neste tipo.
- ✓ Os fenômenos térmicos estão relacionados à transferência de calor de um sólido para outro, bem como à geração de calor devido à fricção interfacial ou à dissipação no volume (viscoelasticidade, viscoelastoplasticidade, acúmulo de dano ou micro-fraturas): a troca de calor pode ser balística ou difusiva, dependendo do tamanho dos pontos de contato, enquanto a troca de calor radiante e convectiva também contribui consideravelmente para a condutividade térmica global.
- ✓ O aquecimento local das superfícies de contato até o ponto de fusão local, reconhecido nos primeiros estudos tribológicos, conhecido como aquecimento por *flash*, tem implicações importantes para o atrito, especialmente em contatos secos.
- ✓ Fenômenos metalúrgicos que ocorrem nas camadas de interface próxima abrangem várias mudanças microestruturais que são, ou desencadeadas por mudanças na temperatura (por exemplo, devido ao joule ou ao aquecimento por atrito) ou por deformações severas, e incluem recristalização dinâmica e várias transformações de fase.

- ✓ Para materiais que sofrem transição vítrea, a elevação local da temperatura pode ser crítica para seu desempenho mecânico: em geral, as propriedades mecânicas são fortemente dependentes da temperatura, tornando o problema termomecânico um dos mais naturais e fortes.
- ✓ Os problemas multifísicos são acoplados nas interações tribológicas, especialmente em regime de contato seco ou no de lubrificação mista da curva de *Stribeck*. Devido ao aquecimento local excessivo, os sólidos podem atingir seu ponto de fusão ou sublimação e experimentar a transição de fase ; Assim, o derretimento, a evaporação e a sublimação parecem ser fenômenos importantes em interações micromecânicas secas e lubrificadas.

2.4.2 LUBRICIDADE PELO MÉTODO HFRR

Existem atualmente diferentes métodos de determinação da lubricidade de um óleo lubrificante disponíveis no mercado. O método de avaliação da lubricidade por meio de sonda de deslocamento alternado de alta frequência é um dos mais utilizados por pesquisadores.

O método de lubricidade HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) como é mais conhecido, simula o regime de lubrificação limítrofe da curva de *Stribeck* para avaliar a capacidade do óleo lubrificante de redução do atrito e do desgaste do par tribológico, acarretado pela substituição do contato seco pelo contato fluido, entre duas superfícies sólidas em movimento relativo.

FARIAS *et al.* (2011) afirmam que a lubricidade é um termo qualitativo que descreve a habilidade de um fluido afetar o atrito entre superfícies sob carga e com movimento relativo, bem como o desgaste nessas superfícies. Ela é avaliada pela escara do desgaste, em μm , produzida em uma esfera animada com deslizamento alternado contra um plano estacionário (ASTM D6079-04).

Estes pesquisadores comentam também ser possível inferir da definição da ASTM que quanto maior a lubricidade, menor a escara do desgaste, assegurando eficácia ao filme lubrificante em sua ação de separação das superfícies sob movimento relativo.

FARIAS *et al.* (2011) relatam ainda que quando o contato entre as superfícies metálicas (esfera-plano) apresenta um percentual de filme próximo de zero significa que há uma queda de potencial no contato e, portanto as superfícies estão significativamente mais próximas. Por fim, eles complementam, uma vez que as superfícies estão mais afastadas, devido à presença do fluido com maior capacidade de lubrificação, o atrito será menor. Ou seja, o coeficiente de atrito no ensaio HFRR é função do percentual de filme de combustível ou óleo lubrificante formado entre as superfícies, e indica o nível de lubricidade do fluido analisado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como finalidade apresentar os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da investigação experimental. Com este propósito, são descritos os procedimentos de obtenção e de avaliação dos nanofluidos híbridos objeto da pesquisa, incluindo principalmente: (1) a seleção das nanopartículas e do fluido-base (2) o método de preparação dos nanofluidos e (3) os testes de avaliação das propriedades termomecânicas: condutividade térmica, viscosidade dinâmica e lubrificidade pelo método HFRR.

As teses de doutorado dos pesquisadores HOLANDA (2018), DE OLIVEIRA (2018), CAVALCANTI (2018), AZEVEDO (2017), RASHEED (2017), SOUZA (2016), ALMEIDA (2015), FARIAS (2015) e os artigos científicos de GUPTA *et al* (2018), SAJID *et al* (2018), DEVENDIRAN *et al* (2018), KUMAR e ARASU (2018), BABU *et al* (2017), NABIL *et al* (2017), ALVES *et al* (2016), SARKAR *et al* (2015) foram as principais referências consultadas para definição e ajustes da metodologia de preparação dos nanofluidos híbridos e das técnicas de avaliação das propriedades termofísicas de condutividade térmica, viscosidade dinâmica e lubrificidade.

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS DO NANOFLUIDO HÍBRIDO

O propósito principal desta pesquisa experimental foi investigar a influência da temperatura e concentração de nanopartículas sólidas nas propriedades termofísicas de um nanofluido híbrido composto de dois nanomateriais dissimilares em suspensão no fluido-base.

O primeiro passo nesta direção foi selecionar os materiais para formulação e obtenção das amostras de teste do nanofluido híbrido proposto.

Tomando-se como base as teses de doutorado anteriormente desenvolvidas em nanofluidos pelo Grupo de Estudos em Sistemas Térmicos (GEST) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, foi definido que o fluido-base da presente pesquisa seria um óleo lubrificante utilizado em compressores de refrigeração e ar condicionado. Dentre os vários óleos lubrificantes disponíveis no mercado, foi selecionado como fluido-base o óleo lubrificante sintético polioéster fabricado pela *Danfoss*: ÓLEO POE 160PZ.

Na sequência foram definidas as duas nanopartículas para formulação do nanofluido híbrido objeto da pesquisa.

Os critérios inicialmente estabelecidos na seleção das nanopartículas do nanofluido híbrido proposto, com base na revisão bibliográfica sobre nanofluidos híbridos foram: (a) condutividade térmica do nanomaterial, (b) custo e facilidade de aquisição.

Os nanomateriais disponíveis foram elencados para seleção na ordem de prioridade: (1) nanotubos de carbono, (2) nanopartículas de alumina, (3) nanopartículas de óxido de titânio, (4) nanopartículas de óxido de cobre, (5) nanopartículas de óxido de nióbio e (6) nanopartículas de óxido de índio.

Os nanomateriais selecionados para formulação do nanofluido híbrido proposto foram: (1) nanotubo de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) e óxidos de alumínio ou alumina (Al₂O₃). Os nanomateriais MWCNTs e Al₂O₃ apresentam condutividade térmica média de 3000 e 40 (W/m.k), respectivamente.

MURSHED e ESTELLE (2017) comentam que um grande número de pesquisas sobre viscosidade de nanofluidos tem sido conduzidas com vários tipos de nanopartículas, incluindo os óxidos metálicos e não metálicos e os nanotubos de carbono.

SUSANTHI e RAJAN (2018) relatam que a adição de nanomateriais aos líquidos alteram suas propriedades termofísicas consideravelmente. A viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos tem sido extensivamente estudadas em virtude forte influencia que exercem sobre a performance do processo de transferência de calor dos nanofluidos.

Estes pesquisadores comentam ainda os fatores que afetam a viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos: tamanho e forma dos nanomateriais, concentração das nanopartículas, aglomeração, viscosidade do fluido-base, interação entre os nanomateriais e as moléculas do fluido-base, surfactantes usados na formulação, pH, dispersão das nanopartículas etc.

3.1.1 FLUIDO-BASE: ÓLEO SINTÉTICO POE

O óleo sintético POE 160PZ utilizado como fluido-base na formulação das amostras de nanofluido híbrido, objeto desta pesquisa, é fabricado pela *Danfoss* e tem sua principal aplicação na lubrificação de compressores de sistemas de refrigeração, sendo compatível com os fluidos refrigerantes R134a, R404a, R507, R508b, R407c e R410a. Suas principais características e especificações são apresentadas na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Óleo sintético polioéster POE 160PZ marca *Danfoss* (a) embalagem comercial e (b) características técnicas.

Óleo Lubrificante Sintético POE 160PZ		
Propriedade	Especificação	Método de Teste
Viscosidade a 40 °C	31 - 33 cSt	ASTM D 445
Viscosidade a 100 °C	5.5 cSt (mín)	ASTM D 445
Densidade a 15,6 °C	0.989 g/ml	ASTM D 4052
Cor	200	ASTM D 1209
Ponto de fluidez	-54 °C (max)	ASTM D 97
Ponto de inflamação	244 °C	ASTM D 93
Rigidez dielétrica a 25 °C	46 kV (mín)	ASTM D 1816
Valor Acidez (Tan)	0.12 mgKOH/g (max)	ASTM D 974

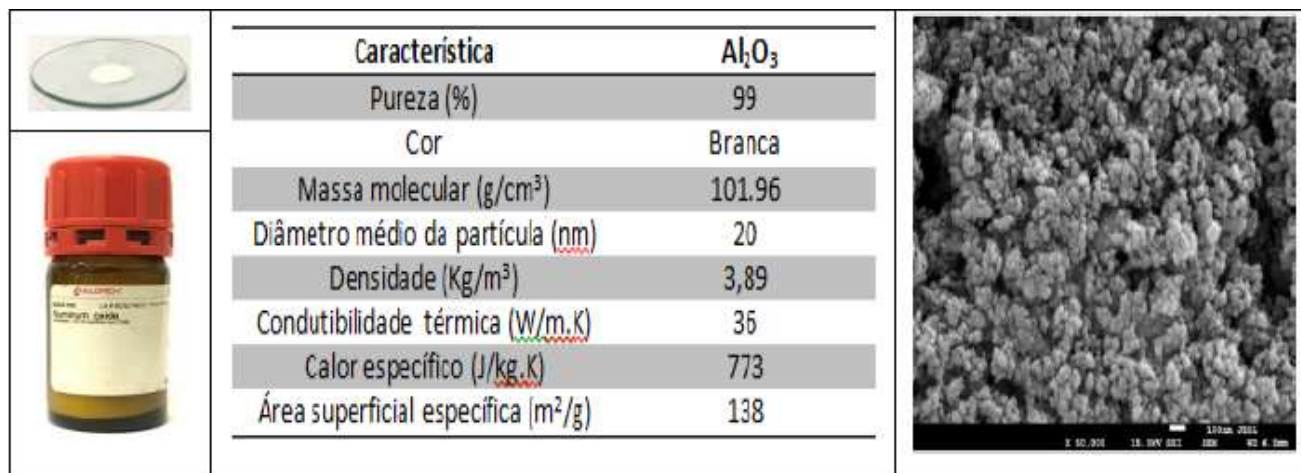
Fonte: Adaptado de DANFOSS (2015)

3.1.2 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDOS DE ALUMÍNIO (Al₂O₃)

De acordo com a literatura consultada, as nanopartículas mais frequentemente utilizadas na formulação de nanofluidos híbridos e simples são os nanotubos de carbono de paredes simples ou múltiplas (MWCNTs, SWCNTs), a alumina ou óxidos de alumínio (Al₂O₃) e os óxidos de titânio (TiO₂), por exibirem excelentes propriedades termofísicas.

As nanopartículas de Al₂O₃ utilizadas na formulação das amostras de nanofluido híbrido, objeto desta pesquisa, são fabricadas na forma de nano-pó seco pela Sigma-Aldrich. As principais características e especificações das nanopartículas de Al₂O₃ são apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Nanopartículas de Al₂O₃: (a) amostra Al₂O₃ e embalagem comercial, (b) especificações técnicas e (c) imagem TEM



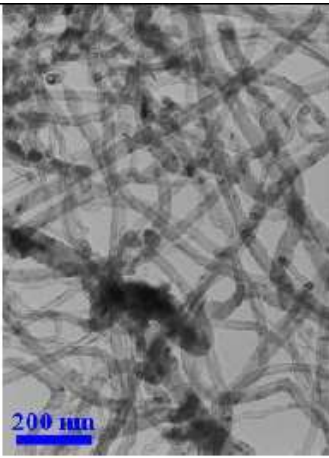
Fonte: Adaptado de ZAWAWI *et al* (2018), DARDAN *et al* (2017) e *site* da SIGMA-ALDRICH

3.1.3 NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS (MWCNTs)

Os nanotubos de carbono de paredes múltiplas ou simples são muito populares na aplicação de nanofluidos em razão da excepcional condutividade térmica, em relação a demais nanopartículas existentes.

Os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) utilizados na formulação das amostras de nanofluido híbrido, objeto desta pesquisa, são fabricadas pela Nanostructured & Amorphous Materiais na forma de nano-pó seco, através do processo de deposição catalítica de vapor químico (CVD). A Figura 3.3. mostra as principais características e especificações das nanopartículas de MWCNTs.

Figura 3.3 – Nanotubos de carbono de paredes múltiplas MWCNTs: (a) amostra e embalagem comercial, (b) especificações técnicas e (c) imagem SEM.

	<table><tr><th>Característica</th><th>MWCNTs</th></tr><tr><td>Pureza (%)</td><td>97</td></tr><tr><td>Cor</td><td>Preta</td></tr><tr><td>Massa molecular (g/cm³)</td><td>101.96</td></tr><tr><td>Diâmetro médio da partícula (nm)</td><td>20-40</td></tr><tr><td>Comprimento do tubo (µm)</td><td>50</td></tr><tr><td>Densidade (Kg/m³)</td><td>2,10</td></tr><tr><td>Condutibilidade térmica (W/m.K)</td><td>4000</td></tr><tr><td>Calor específico (J/kg.K)</td><td>773</td></tr><tr><td>Área superficial específica (m²/g)</td><td>233</td></tr></table>	Característica	MWCNTs	Pureza (%)	97	Cor	Preta	Massa molecular (g/cm³)	101.96	Diâmetro médio da partícula (nm)	20-40	Comprimento do tubo (µm)	50	Densidade (Kg/m³)	2,10	Condutibilidade térmica (W/m.K)	4000	Calor específico (J/kg.K)	773	Área superficial específica (m²/g)	233	
Característica	MWCNTs																					
Pureza (%)	97																					
Cor	Preta																					
Massa molecular (g/cm³)	101.96																					
Diâmetro médio da partícula (nm)	20-40																					
Comprimento do tubo (µm)	50																					
Densidade (Kg/m³)	2,10																					
Condutibilidade térmica (W/m.K)	4000																					
Calor específico (J/kg.K)	773																					
Área superficial específica (m²/g)	233																					

Fonte: Adaptado de ZAWAWI *et al* (2018), DARDAN *et al* (2017) e site da NANOSTRUCTURED & AMORPHOUS MATERIALS, INC.

3.2 MÉTODO DE PREPARAÇÃO DO NANOFLUIDO HÍBRIDO

Com o intuito de investigar a sensibilidade das propriedades termofísicas (condutividade térmica, viscosidade dinâmica e lubrificidade) com relação à concentração das nanopartículas sólidas dispersas no fluido-base do nanofluido, foram preparadas pelo método de “dois passos” um total de 12 (doze) amostras de nanofluidos, sendo a composição de cada amostra apresentada na Tabela 3.1.

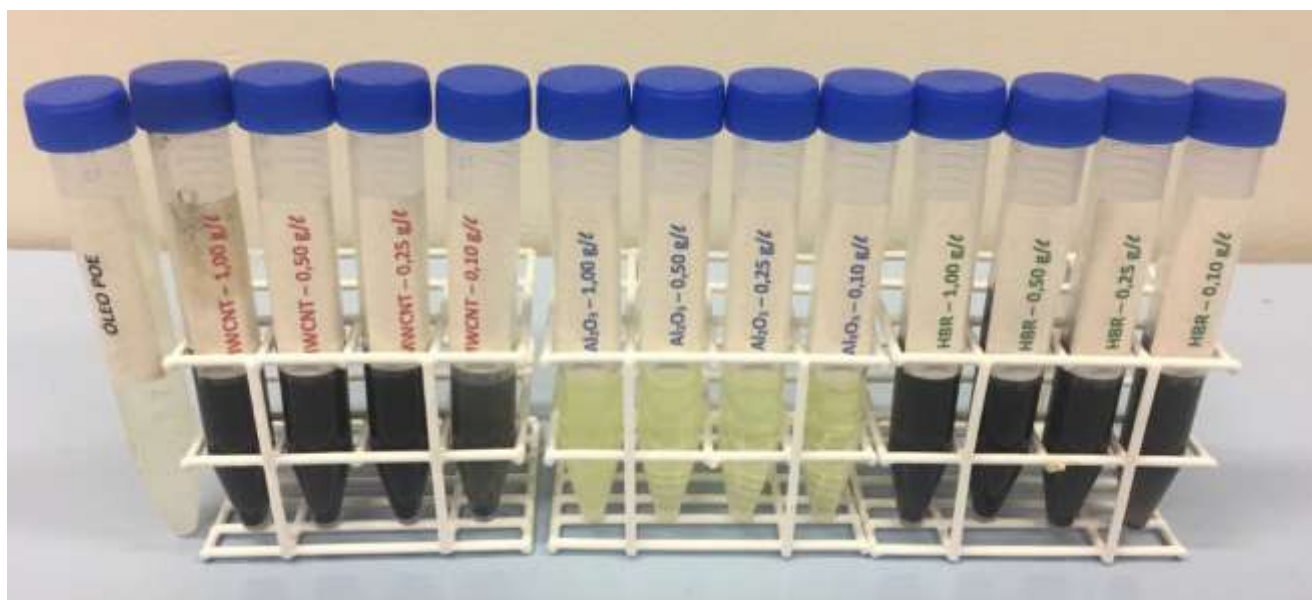
Tabela 3.1 – Composição das amostras de nanofluidos híbridos e simples para testes das propriedades termofísicas.

NANOFLUIDO	COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA	CONCENTRAÇÃO (g/L)	TAMANHO DA AMOSTRA (ml)
Híbrido	MWCNTs-Al ₂ O ₃ /POE	0,10	100
		0,25	
		0,50	
		1,00	
Simples	MWCNTs/POE	0,10	
		0,25	
		0,50	
		1,00	
Simples	Al ₂ O ₃ /POE	0,10	
		0,25	
		0,50	
		1,00	

Fonte: Autor

A Figura 3.4 apresenta amostras de nanofluidos híbridos e simples objeto da investigação, sendo 04 amostras de nanofluidos híbridos (MWCNTs-Al₂O₃/POE), outras 04 amostras de nanofluidos simples (MWCNTs/POE) e mais 04 amostras de nanofluidos simples (Al₂O₃/POE), totalizando 12 amostras de nanofluidos de teste.

Figura 3.4 – Amostras de nanofluidos híbridos, simples e fluido-base:.



Fonte: Autor

O método de “dois passos” simples e de baixo custo possui duas fases: a primeira fase compreende unicamente a síntese dos nano-pós de alumina (Al₂O₃) e de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs), isto é, o processo de produção das nanopartículas sólidas.

A segunda fase que consiste na formulação do nanofluidos híbridos ou simples, a partir dos seus constituintes (nanopartículas + fluido-base) adquiridos no comércio especializado, apresenta a seguinte sequência de execução:

- i. *Medição da massa de nano-pós:* a quantidade de massa, para cada tipo de nanopartícula (Al₂O₃ e MWCNTs), correspondente a concentração em (g/L) das diferentes amostras de nanofluido apresentadas na Tabela 3.1 foi mensurada em balança analítica com resolução de 0,0001 g;
- ii. *Medição do volume do fluido-base:* a medição do volume de 100 ml do fluido-base (óleo POE 160PZ) foi realizada com auxílio de micropipeta e becker graduado.

iii. *Mistura das nanopartículas sólidas no fluido-base*: após inserir as nanopartículas no fluido-base, misturam-se as nanopartículas (Al₂O₃ e MWCNTs) no meio líquido (óleo POE 160PZ), com o auxílio de uma vareta de vidro;

iv. *Desfragmentação das nanopartículas*: para atenuar as aglomerações e melhorar a estabilidade das amostras, todos os nanofluidos foram submetidos a processo de sonicação por meio de ultrassom de imersão com amplitude de vibração de 10%, com tempo de duração de 60 minutos.

v. *Dispersão das nanopartículas no fluido-base*: a etapa final de síntese do nanofluido foi a dispersão das nanopartículas sólidas no meio líquido (fluido-base) por meio de agitador rotativo magnético, com rotação de 450 rpm e duração de 24 horas.

A Figura 3.5 mostra a medição das massas para diferentes concentrações, na proporção de 50% / 50% de nano-pós de Al₂O₃ e MWCNTs, necessárias para preparação de uma amostra de 100 ml de nanofluido híbrido.

A Figura 3.5 – Medição das massas das nanopartículas de Al₂O₃ e MWCNTs para diferentes amostras de nanofluido híbrido.



Fonte: Autor

A Figura 3.6 ilustra o processo de desfragmentação dos nanofluidos híbrido com ultrasonicador digital BRANSON com sonda de imersão pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio grande do Norte (UFRN).

A **Figura 3.6** – Desfragmentação das nanopartículas aglomeradas no fluido-base do nanofluido por meio de ultrassom de imersão: (a) display, (b) cabeçote e (c) ponteira de imersão



Fonte: Autor

No processo de desfragmentação das nanopartículas aglomeradas, o tempo de sonicação de 60 minutos foi definido com base no tempo de sonicação observado para o nanofluido de Al₂O₃-MWCNTs/Óleo Térmico da Tabela 2.1. A amplitude de frequência de sonicação de 10% foi selecionada para que a temperatura do nanofluido de teste não ultrapasse 60 °C, uma vez que o equipamento utilizado de ultrasonicação por sonda de imersão não possuía sistema de refrigeração para controle da temperatura do nanofluido de teste.

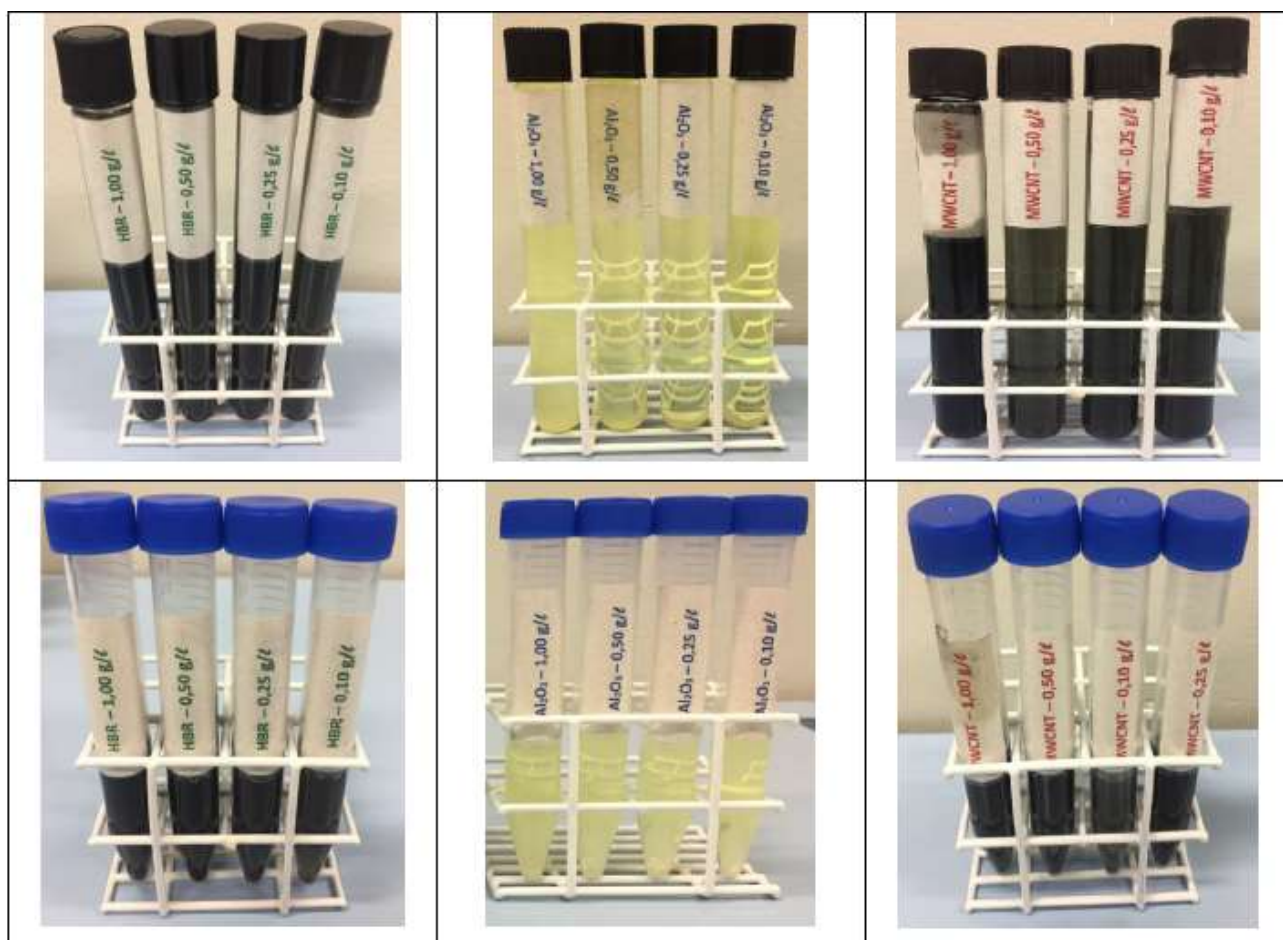
3.3 ESTABILIDADE DO NANOFLUIDO

A avaliação da estabilidade das amostras de todos os nanofluidos híbridos e simples foi feita utilizando o método simples de sedimentação das nanopartículas de alumina e nanotubos de carbono em suspensão no óleo POE. Para tanto, as amostras destes nanofluidos, em diferentes concentrações listadas na Tabela 3.1, foram acondicionadas em tubos de ensaio e em tubos do tipo *Falcon*, dispostos na posição vertical em repouso.

A Figura 3.7 apresenta os nanofluidos híbridos e simples acondicionados em tubos *Falcon* e de ensaio, para observação da sedimentação em função do tempo.

Os tubos *Falcon* têm o formato afunilado na extremidade inferior e com isso o nível de sedimentos depositados no fundo do recipiente aumenta mais rapidamente do que nos tubos de ensaio de seção transversal constante, facilitando a visualização do processo de sedimentação.

Figura 3.7 - Amostras de nanofluidos híbridos e simples acondicionadas em tubos de ensaio e *Falcon* para verificação da ocorrência de sedimentação.



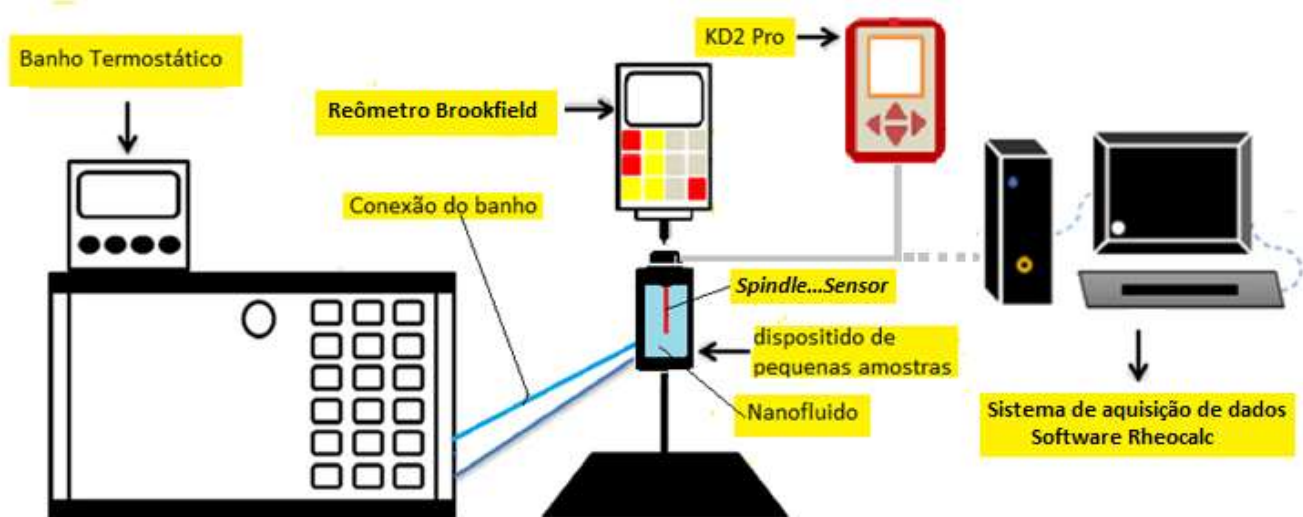
Fonte: Autor

3.4 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A Figura 3.8 apresenta a bancada experimental do Laboratório de Energia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, que foi utilizada nesta pesquisa para medição de condutividade térmica e viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos híbridos e simples, contendo: (1) analisador de propriedades térmicas KD2 Pro da marca Decagon Devices, (2) banho termostático Brookfield modelo

TC-550 (3) reômetro programável DVIII-Ultra Brookfield (4) dispositivo de pequenas amostras modelo SC-13R com sensor de temperatura incorporado da marca Brookfield (5) sistema de aquisição de dados e (6) software Rheocalc versão 3.3 Brookfield.

Figura 3.8 – Bancada experimental de medição das propriedades termofísicas de nanofluidos híbridos e simples.



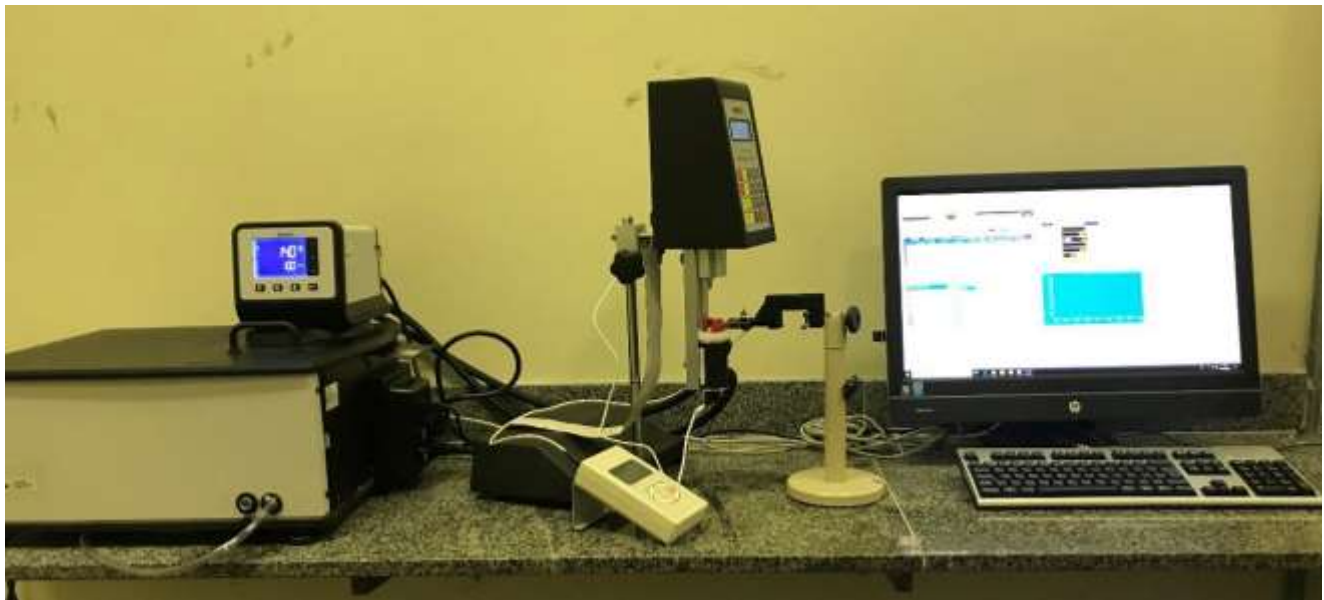
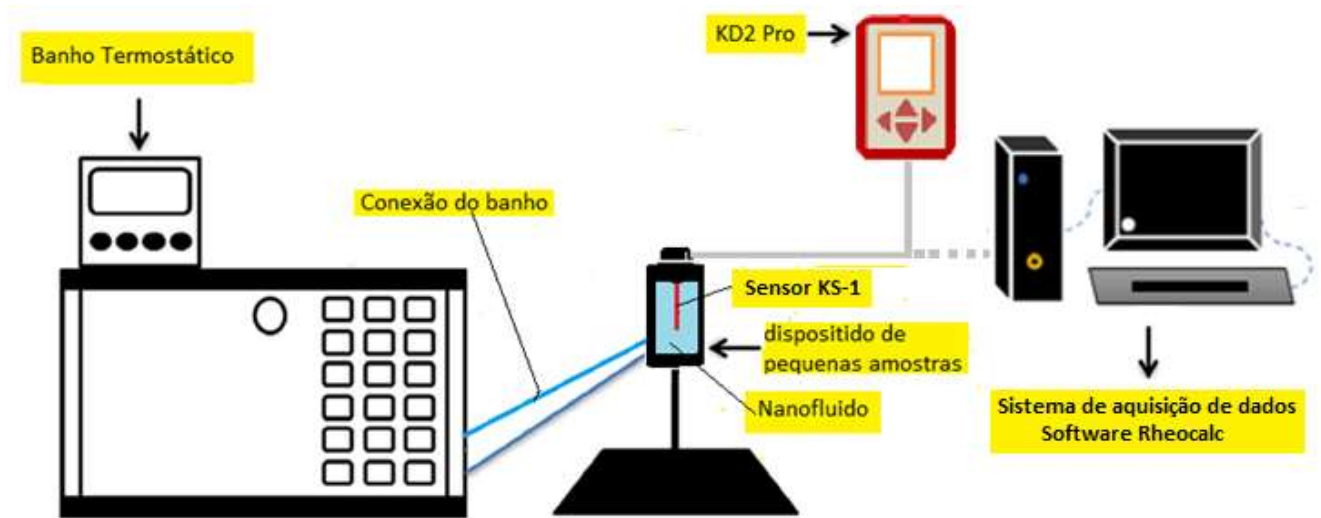
Fonte: Adaptado de HAMID *et al* (2018)

3.4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO NANOFLUIDO

A Figura 3.9 apresenta o conjunto experimental utilizado para medição da condutividade térmica das amostras de nanofluidos contendo: (1) analisador de propriedades térmicas KD2 Pro da marca Decagon Devices, (2) banho termostático Brookfield modelo TC-550 (3) dispositivo de pequenas amostras modelo SC-13R com sensor de temperatura incorporado da marca Brookfield, (4) sistema de aquisição de dados e (5) software Rheocalc versão 3.3 Brookfield.

Figura 3.9 – Medição de condutibilidade térmica com analisador de propriedades térmicas KD2 Pro:

(a) bancada simplificada (b) foto do conjunto experimental



Fonte: Adaptado de HAMID et al (2018) e Holanda (2018)

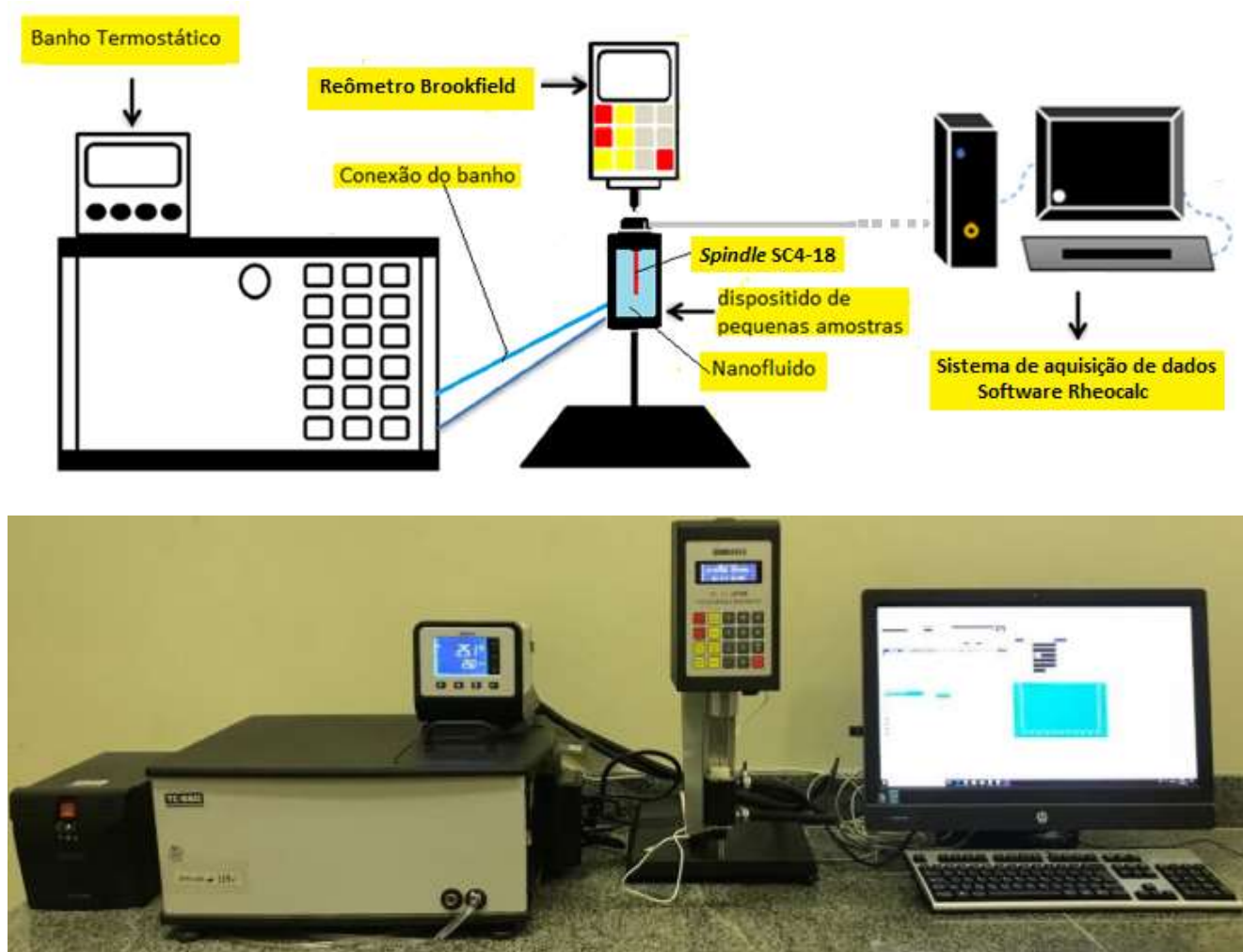
O intervalo de temperatura do teste foi programado no Rheocalc e toda a operação ocorre de forma automática, sendo a aquisição dos dados de condutividade térmica capturada no datalog do KD2 Pro. Posteriormente os dados obtidos e armazenados no datalog são transferidos para uma planilha eletrônica para análise.

O analisador de propriedades térmicas KD2 Pro e o sensor KS-1 são calibrados com fluido padrão de referência (glicerina), antes de iniciar cada teste de medição da condutividade térmica do nanofluido, conforme instruções e recomendações do fabricante do equipamento.

3.4.2 VISCOSIDADE DO NANOFLUIDO

Os ensaios de viscosidade dinâmica de todas as amostras de nanofluidos foram realizados na configuração da bancada experimental mostrada na Figura 3.10 contendo: (1) reômetro DVLVIII-Ultra da Brookfield com dispositivo de pequenas amostras e spindle SC4-18 (2) banho termostático Brookfield (3), (4) sistema de aquisição de dados e (5) o software Rheocalc versão 3.3 da Brookfield. Somente uma amostra de 6,7 ml de nanofluido é usada para medição de viscosidade.

Figura 3.10 – Medição de viscosidade dinâmica com reômetro LVDVIII-Ultra da Brookfield: (a) bancada simplificada (b) foto do conjunto experimental.



Fonte: Adaptado de HAMID *et al* (2018) e Holanda (2018)

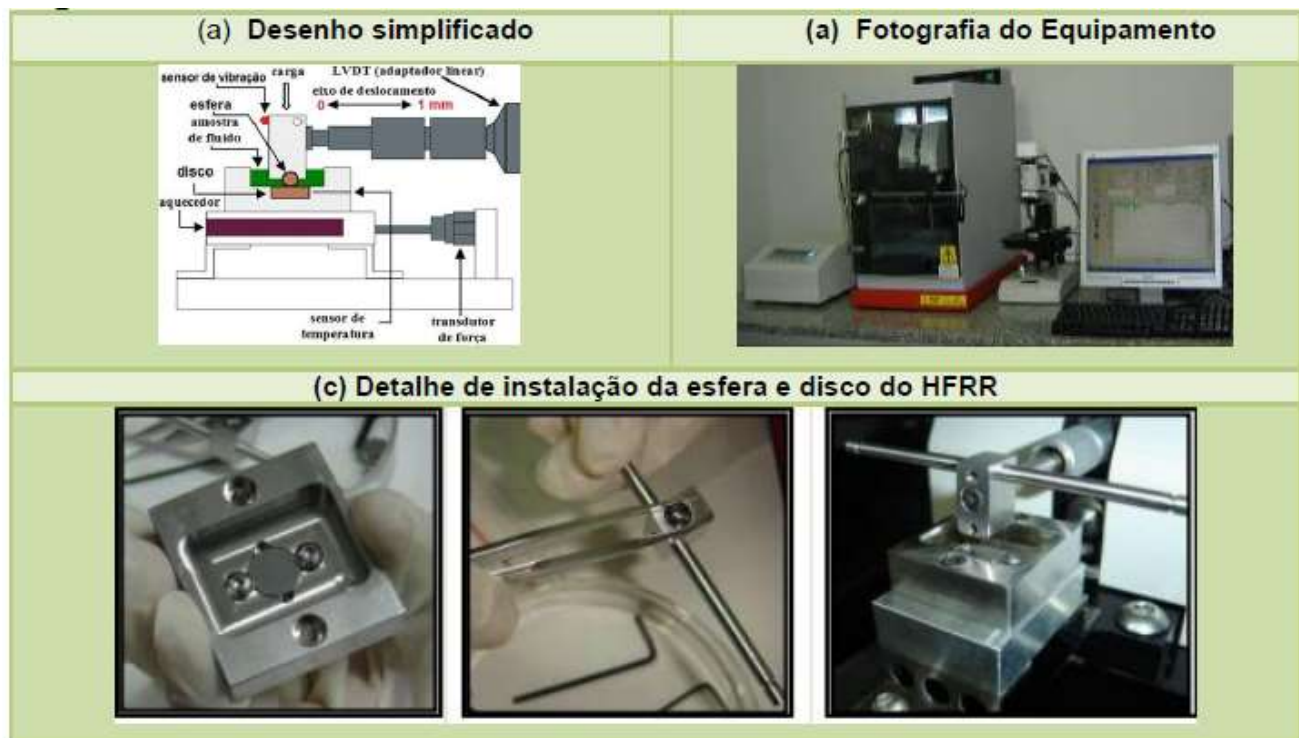
O ensaio de viscosidade é totalmente automatizado e a programação é definida e executada com o auxílio do software Rheocalc versão 3.3. Dessa forma, o experimento pode ser facilmente reproduzido para todas as amostras de nanofluidos.

Após o teste de viscosidade do nanofluido, o software Rheocalc exibe o relatório com a leitura dos valores de todas as variáveis mensuradas: viscosidade dinâmica, velocidade, torque da mola, tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento, temperatura da câmara de amostras, temperatura do banho térmico termostático, instante de tempo de leitura das variáveis, *spindle* usado, data e hora do teste etc.

3.4.3 TESTE DE LUBRICIDADE HFRR

A Figura 2.11 mostra a bancada de teste de lubricidade HRFF ou simplesmente tribômetro HFRR da marca PCS Instruments, pertencente ao Laboratório do Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural da UFRN, utilizada para avaliação da lubricidade de todos os nanofluidos desta pesquisa.

Figura 3.11– Bancada de teste de lubricidade HFRR



Fonte: Adaptado de FARIAS *et al.* (2011) e FARIAS *et al.* (2010)

Os parâmetros do teste de lubricidade HFRR e as características geométricas, dimensionais e de composição dos materiais do par tribológico esfera/disco são estabelecidos com base nas normas ASTM D6079-99 e ISO 12156-1:1997.

Com o equipamento em funcionamento, a esfera de aço é acionada e descreve um movimento alternado de curso limitado com alta frequência, sob a ação de uma carga normal preestabelecida no teste, e o disco de teste é fixado em uma pequena cuba contendo a amostra óleo lubrificante.

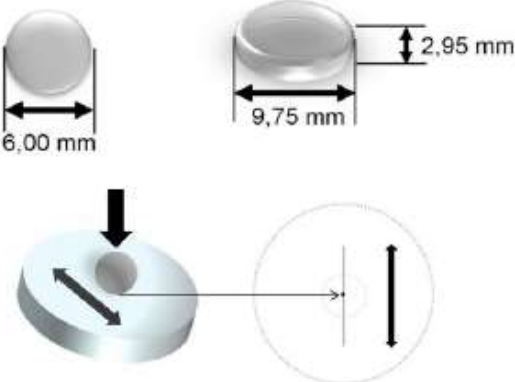
O ensaio de lubricidade HFRR consiste basicamente no deslizamento da superfície de um corpo-de-prova esférico sobre a superfície plana estacionária do disco de teste. O desempenho de lubricidade de cada nanofluido ensaiado foi analisado em função dos valores médios do coeficiente de atrito e da área de desgaste da esfera de aço (WSD).

As superfícies do par tribológico esfera/disco foram integralmente imersas na amostra do fluido de teste (nanofluido (híbrido ou simples) ou ainda o óleo POE). O teste se desenvolve de forma automática e os parâmetros de performance do HFRR como o coeficiente de atrito, espessura da película do fluido de teste e temperatura do contato são exibidos, em tempo real, na tela do equipamento de aquisição de dados computadorizado.

Após o término do ensaio de lubricidade HFRR, a esfera de aço é removida e limpa para medição, com auxílio de microscópio óptico com ampliação de 100X, da cicatriz de desgaste da esfera de aço com base na média dos diâmetros nas direções (X e Y).

A Tabela 3.2 mostra o par tribológico e as condições estabelecidas do teste de lubricidade HFRR para o nanofluido híbrido. As mesmas condições foram reproduzidas nos testes de lubricidade das demais amostras de nanofluido.

Tabela 3.2 – Lubricidade HFRR: (a) par tribológico esfera/disco e (b) condições do teste.

	<table> <tr> <th>CONDIÇÕES DE TESTE</th><th>VALORES</th></tr> <tr> <td>Fluido de teste</td><td>Al₂O₃-MWCNTs/POE</td></tr> <tr> <td>Temperatura do fluido [°C]</td><td>40 ± 2</td></tr> <tr> <td>Volume do fluido [ml]</td><td>2,0 ± 0,2</td></tr> <tr> <td>Curso da esfera [mm]</td><td>1,00 ± 0,02</td></tr> <tr> <td>Frequência de oscilação [Hz]</td><td>20 ± 2</td></tr> <tr> <td>Carga aplicada [N]</td><td>2 ± 0,01</td></tr> <tr> <td>Duração do ensaio [min]</td><td>60 ± 0,1</td></tr> <tr> <td>Umidade relativa [%]</td><td>> 30</td></tr> </table>	CONDIÇÕES DE TESTE	VALORES	Fluido de teste	Al ₂ O ₃ -MWCNTs/POE	Temperatura do fluido [°C]	40 ± 2	Volume do fluido [ml]	2,0 ± 0,2	Curso da esfera [mm]	1,00 ± 0,02	Frequência de oscilação [Hz]	20 ± 2	Carga aplicada [N]	2 ± 0,01	Duração do ensaio [min]	60 ± 0,1	Umidade relativa [%]	> 30
CONDIÇÕES DE TESTE	VALORES																		
Fluido de teste	Al ₂ O ₃ -MWCNTs/POE																		
Temperatura do fluido [°C]	40 ± 2																		
Volume do fluido [ml]	2,0 ± 0,2																		
Curso da esfera [mm]	1,00 ± 0,02																		
Frequência de oscilação [Hz]	20 ± 2																		
Carga aplicada [N]	2 ± 0,01																		
Duração do ensaio [min]	60 ± 0,1																		
Umidade relativa [%]	> 30																		

Fonte: Adaptado de HOLANDA (2018) e FARIAS (2011)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes de propriedades (termofísicas, reológicas e de lubricidade pelo método HFRR) das amostras de nanofluidos híbridos MWCNTs-Al₂O₃/POE e

simples (Al₂O₃/POE ou MWCNTs/POE), com concentrações gravimétricas entre 0,1-1,0 g/L e amplo intervalo de temperaturas. O fluido-base de referencia (óleo POE) também foi testado no mesmo intervalo de temperatura e os resultados obtidos são analisados e comparados.

4.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os ensaios de condutividade térmica das amostras de nanofluidos e do óleo POE foram executados com ampla faixa de temperatura entre 10-50 °C com incrementos de 5 °C, totalizando 11 pontos de medição da temperatura, sendo efetuadas 5 leituras em cada ponto, perfazendo 55 medições de temperatura por cada amostra testada.

Todos os ensaios de condutividade térmica *versus* temperatura foram conduzidos de forma totalmente automática e a programação realizada com auxílio do software Rheocalc versão 3.3 da Brookfield. Os dados de condutividade térmica foram aquisitados no *data log* do instrumento KD2 Pro e posteriormente transferido para uma planilha eletrônica para plotagem dos gráficos.

A automação do ensaio de condutividade térmica possibilitou a reprodução do teste de modo igual para todas as amostras de nanofluido, sem a interferência do operador, permitindo aumentar o nível de confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Para efeito de análise, nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 foram plotados os gráficos de condutividade térmica *versus* temperatura dos nanofluidos híbridos de MWCNTs e Al₂O₃, dos nanofluidos simples de MWCNTs e dos nanofluidos simples de Al₂O₃, respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta a condutividade térmica *versus* temperatura de todos os nanofluidos ensaiados. No Apêndice A é apresentado o gráfico individual de condutividade térmica *versus* temperatura de cada nanofluido e do fluido-base, ensaiados. São 12 gráficos de condutividade térmica de nanofluidos e mais 01 gráfico do óleo POE de referência.

Analisando as Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 percebe-se facilmente na faixa de temperatura de 10 °C a 40 °C que a condutividade térmica de cada amostra de nanofluido praticamente se mantém constante e em temperaturas mais elevadas, há uma tendência de redução da condutividade térmica com o aumento da temperatura da amostra do nanofluido. O comportamento normal, segundo a literatura, seria de crescimento da condutividade térmica com o aumento da temperatura.

Também pode ser observado nestas mesmas figuras uma maior dispersão dos valores de condutividade térmica nas temperaturas mais elevadas. Esta anomalia é justificada pelo fabricante

que não recomenda o uso do analisador de propriedades térmicas KD2 Pro em temperaturas acima de 55 °C, pois nesta faixa de temperatura, as correntes convectivas podem causar instabilidade nas medições, e portanto, os valores obtidos devem ser descartados.

Nota-se também, da análise destes gráficos, uma tendência de intensificação da condutividade térmica com o aumento da concentração de nanopartículas sólidas no meio líquido. Esta tendência é consoante com dados da maioria dos pesquisadores encontrados na literatura.

No gráfico da Figura 4.1, visualiza-se claramente que, em toda faixa de temperaturas estáveis de medição do instrumento KD2 Pro, isto é, de 10 °C e 40 °C, que o nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com 1,00 g/L apresenta condutividade térmica superior ao do fluido-base (óleo POE) e aos demais nanofluidos híbridos e simples ensaiados.

O óleo POE 160PZ, usado como fluido-base nesta pesquisa, apresenta valores mais baixos de condutividade térmica em toda faixa de temperatura estável, em comparação com os nanofluidos híbridos.

O nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com 1,00 g/L apresenta ganho máximo de condutividade térmica de 14,28% em relação ao óleo POE na temperatura de 450C.

Os nanofluidos simples de MWCNTs e Al₂O₃ e o óleo POE com 1,00 g/L, apresentaram ganho máximo de condutividade térmica de 9,03% e 6,31% em relação ao óleo POE, tendo ocorrido nas temperaturas de 10 °C e 35 °C, respectivamente.

Analisando ainda as Figuras 4.1, 4.3, e 4.4, observa-se também que a condutividade térmica do nanofluido simples de MWCNTs tem melhor desempenho do que o nanofluido simples de Al₂O₃, para as mesmas concentrações de nanomateriais sólidos em suspensão no meio líquido, uma vez que a condutividade térmica dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas é cerca de 100 vezes maior do que a condutividade térmica da alumina.

Figura 4.1 Condutividade térmica dos nanofluidos híbridos MWCNTs-Al₂O₃/POE e simples (Al₂O₃/POE e MWCNTs/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE *versus* temperatura.

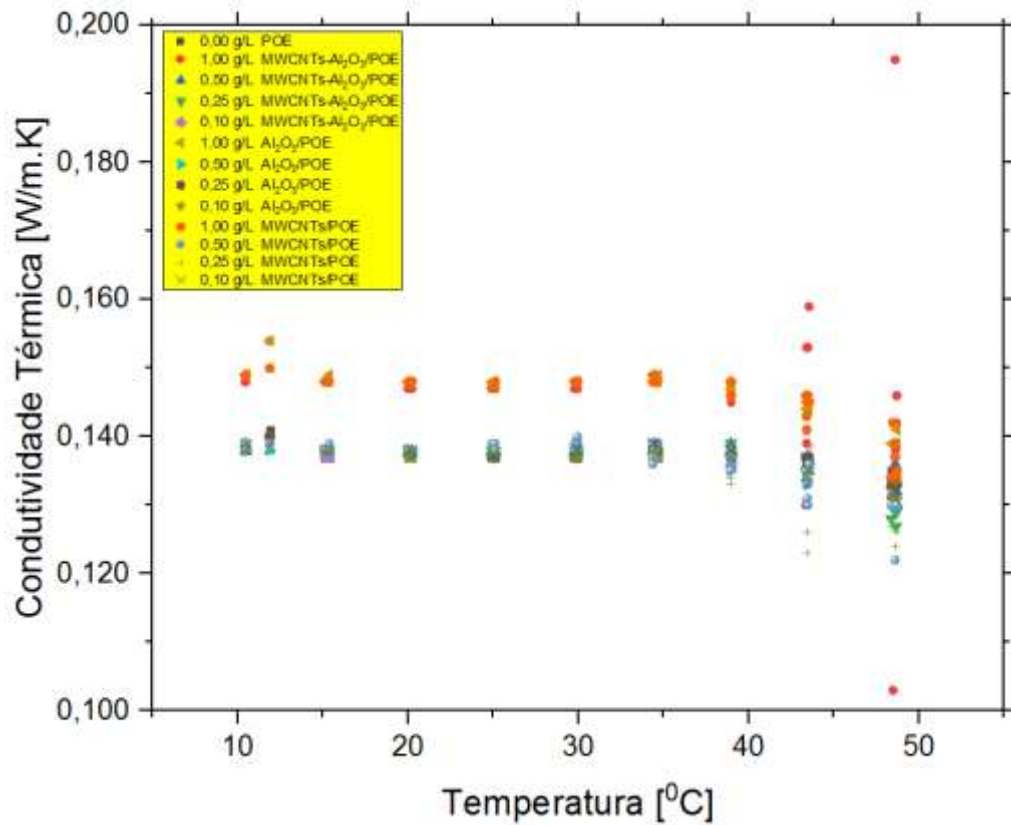


Figura 4.2 Condutividade térmica dos nanofluidos híbridos MWCNTs-Al₂O₃/POE e com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE *versus* temperatura.

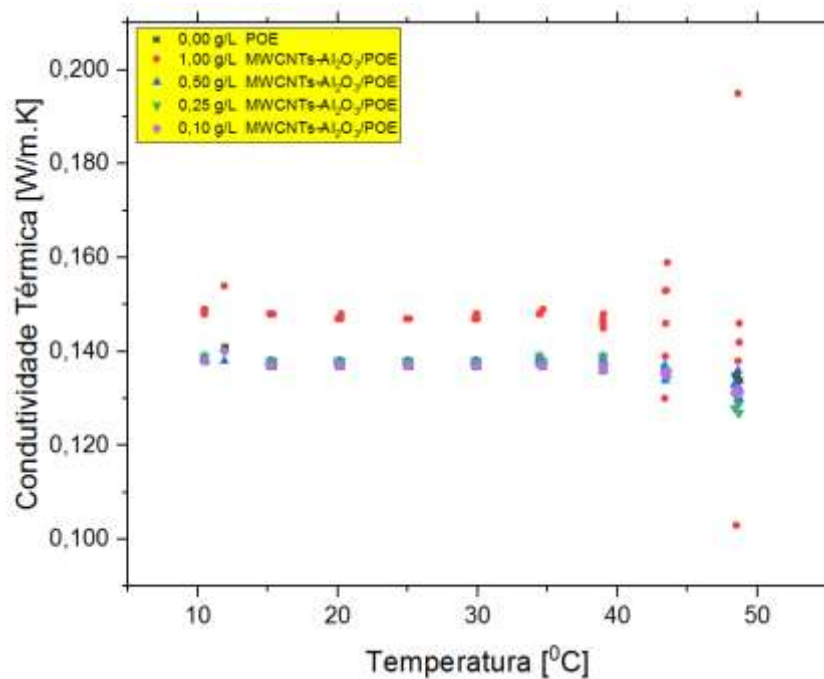


Figura 4.3 Condutividade térmica dos nanofluidos simples Al₂O₃/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE *versus* temperatura.

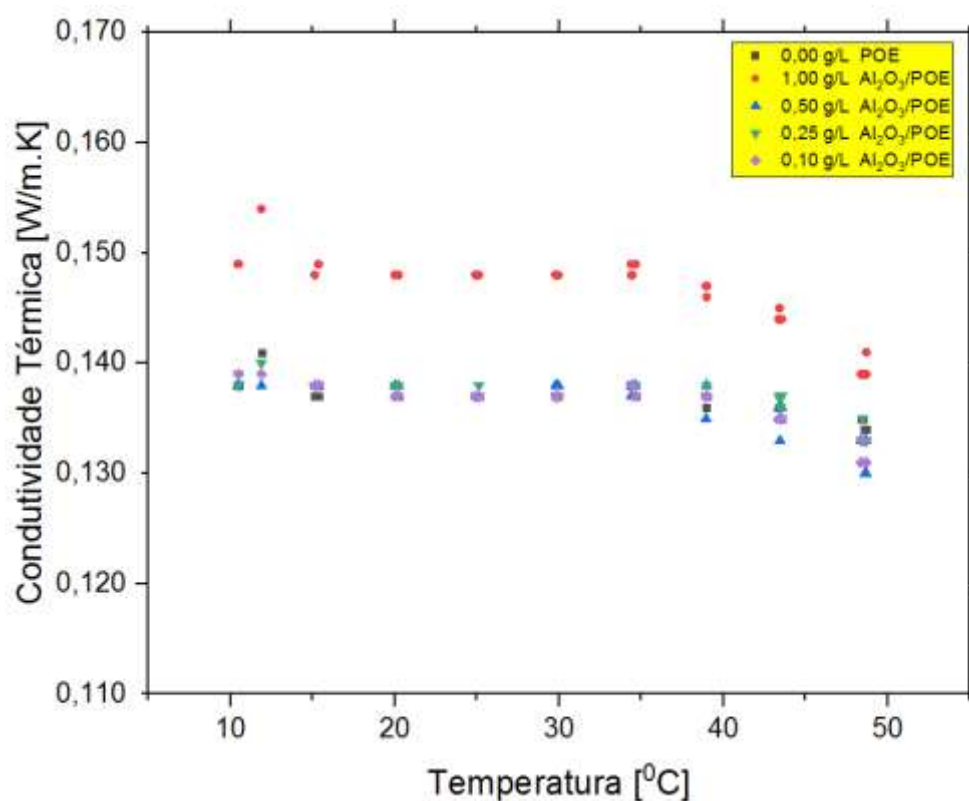
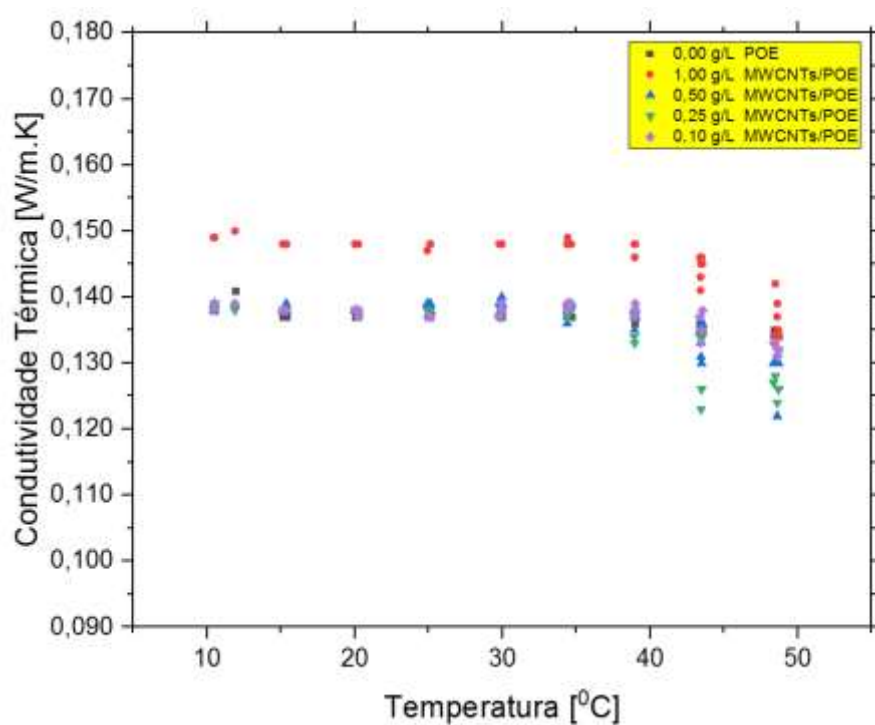


Figura 4.4 Condutividade térmica dos nanofluidos simples MWCNTs/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L e do óleo POE *versus* temperatura.



4.2 VISCOSIDADE DINÂMICA

A viscosidade dinâmica é uma propriedade importante no processo de transferência de calor convectiva uma vez que exerce influência de maneira bastante significativa na potência de bombeamento necessária para recalque dos fluidos em movimento.

Todos os ensaios de viscosidade dinâmica *versus* temperatura também foram conduzidos de forma totalmente automática e a programação realizada com auxílio do software Rheocalc versão 3.3 da Brookfield. Os dados de viscosidade dinâmica foram aqusitados e armazenados na forma digital pelo sistema de aquisição dados computadorizado através do Rheocalc e posteriormente transferido para uma planilha eletrônica para plotagem dos gráficos.

De forma análoga ao ensaio de condutividade térmica, a automação do ensaio de viscosidade dinâmica também possibilitou a reprodução do teste de modo igual para todas as amostras de nanofluido, sem a interferência do operador, permitindo aumentar o nível de confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 foram plotados os gráficos de viscosidade dinâmica *versus* temperatura dos nanofluidos híbridos de MWCNTs e Al₂O₃, dos nanofluidos simples de MWCNTs e dos nanofluidos simples de Al₂O₃, respectivamente. Na Figura 4.5, os gráficos de viscosidade dinâmica *versus* temperatura são plotados para todas as amostras de nanofluidos.

O gráfico individual de viscosidade dinâmica *versus* temperatura de cada nanofluido ensaiado e também do fluido-base encontra-se no apêndice B. Foram 12 ensaios de viscosidade com nanofluidos híbrido ou simples e mais 01 ensaio com o fluido-base de referência.

O intervalo de temperatura para avaliação da viscosidade dinâmica dos nanofluidos foi de 20 a 80 °C, com incremento de 5 em 5 °C, No total foram estabelecidos 13 pontos de medição da viscosidade em cada ensaio, e em cada ponto de medição foram efetuadas 5 leituras da viscosidade.

Observa-se em todos os gráficos das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 que a viscosidade dinâmica é fortemente dependente da variável temperatura e que ela diminui com o aumento da temperatura.

Os perfis de viscosidade dinâmica *versus* temperatura de todos os nanofluidos e do fluido-base ensaiados são muito semelhantes e guardam uma margem muito estreita de variação dos valores desta propriedade entre elas em função da concentração de nanopartículas sólidas (g/L) em suspensão no meio líquido (fluido-base)..

Em outras palavras, percebe-se claramente em todos estes gráficos que os valores de viscosidade dinâmica permanecem praticamente inalterados com a variação da concentração de nanopartículas sólidas em suspensão.

Este comportamento da viscosidade é muito positivo do ponto de vista da aplicação do nanofluido em aplicações de engenharia pois não compromete a potência de bombeamento ou recalque em processo de transferência de calor em que há o escoamento do fluido térmico.

Figura 4.5 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos simples Al₂O₃/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L *versus* temperatura

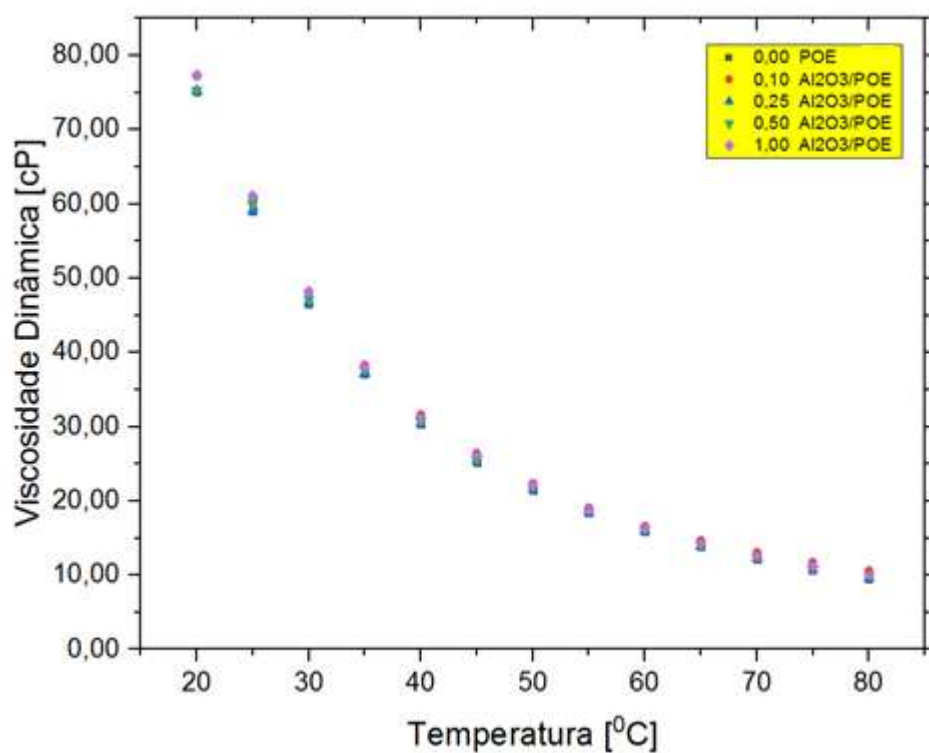


Figura 4.6 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos simples MWCNTs/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L *versus* temperatura

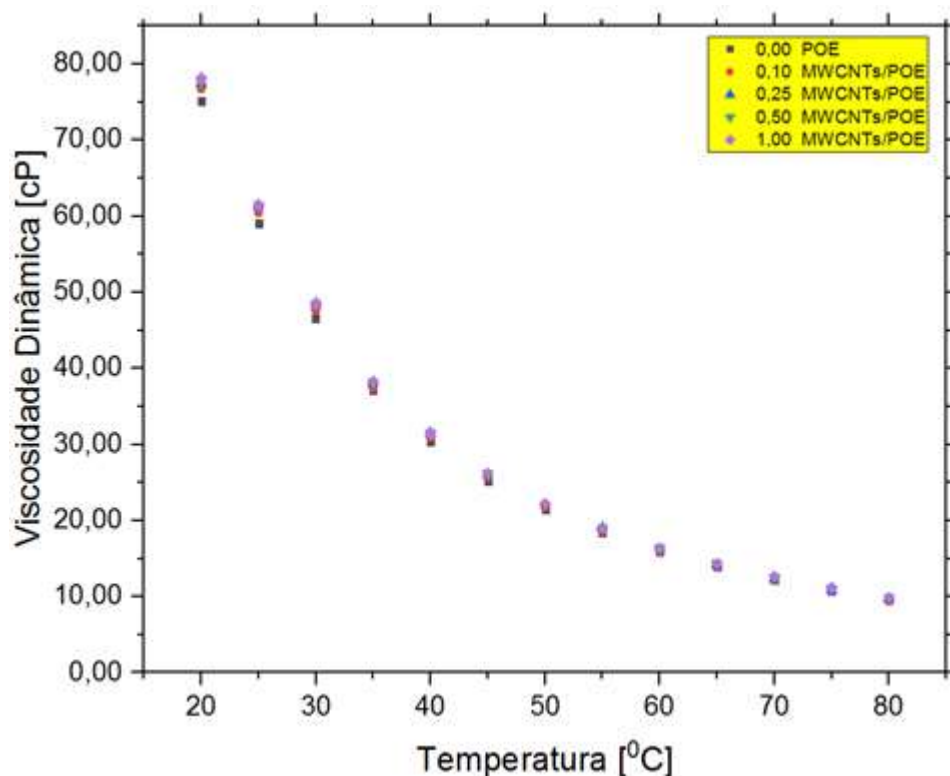


Figura 4.7 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L e *versus* temperatura

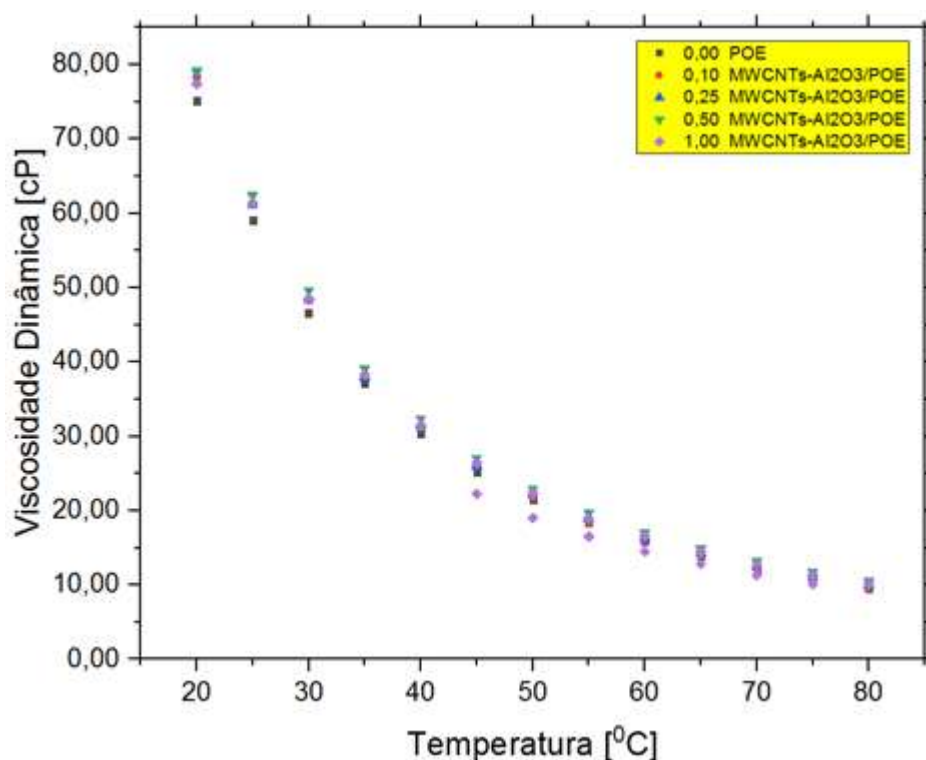
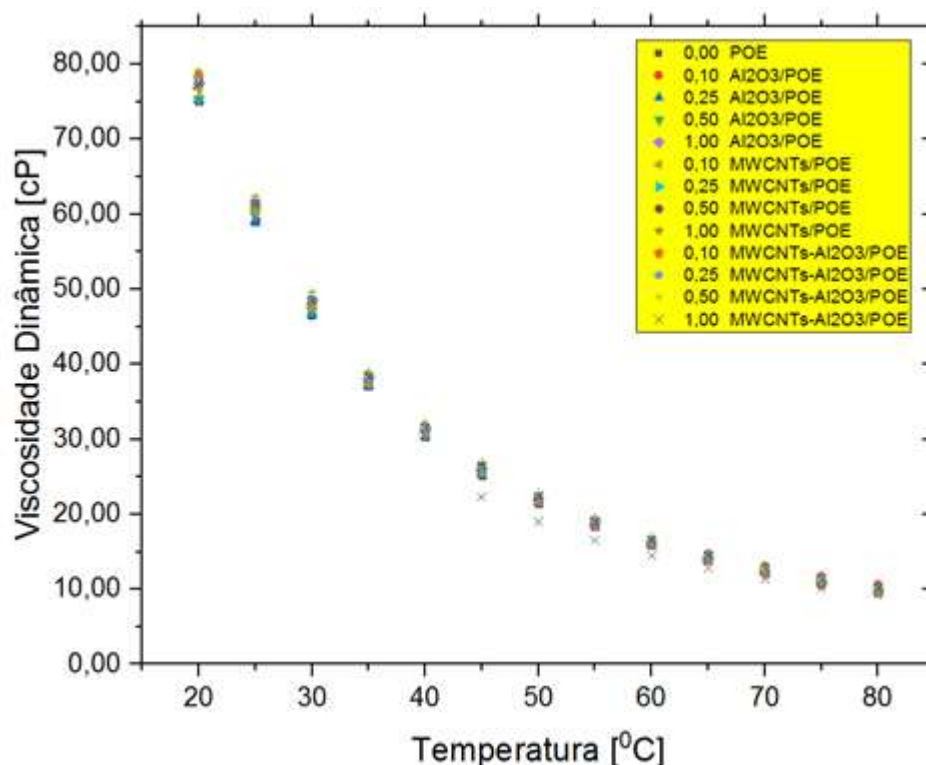


Figura 4.8 – Viscosidade dinâmica do óleo POE e de nanofluidos híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE e simples (Al₂O₃/POE, MWCNTs-Al₂O₃/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,00 g/L *versus* temperatura



4.3 LUBRICIDADE HFRR

Os ensaios de lubricidade HFRR das amostras de nanofluidos e do óleo POE foram executados com temperatura de contato do par tribológico esfera-disco de 50 °C e com duração de 60 minutos. Os gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo e a escara de desgaste (WSD) da esfera dos fluidos ensaiados estão representados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente.

Todos os ensaios de lubricidade *versus* tempo foram conduzidos de forma totalmente automática e a programação realizada com auxílio do software dedicado do próprio tribômetro HFRR da marca PCS instruments. Os dados de coeficiente de atrito e espessura do filme foram coletados a uma taxa de 1 segundo através do sistema de aquisição de dados do próprio instrumento e a escara de desgaste (WSD) da esfera foi medida com auxílio de microscópio óptico com ampliação de 100X. O coeficiente de atrito e o WSD foram os parâmetros utilizados para avaliação da lubricidade.

A automação do ensaio de lubricidade HFRR possibilitou a reprodução do teste de modo igual para todas as amostras de nanofluido, sem a interferência do operador, permitindo aumentar o nível de confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos.

As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 do coeficiente de atrito *versus* tempo têm a forma de uma “nuvem” de pontos. Este aspecto de nuvem é causado pela quantidade de pontos representados no gráfico por cada amostra de nanofluido ensaiada. Foram 3600 leituras do coeficiente de atrito adquiridas durante o ensaio de 60 minutos (uma leitura a cada segundo).

Nestas figuras observa-se facilmente que, em todos os ensaios de lubricidade HFRR, o coeficiente de atrito dos nanofluidos apresentou uma tendência de crescimento com o tempo.

Também se verifica nos primeiros segundos de ensaio, a característica do *running*, em que os valores do coeficiente de atrito aumentam a partir do zero e passa por uma fase de instabilidade no início do ensaio (faixa da nuvem de pontos mais alargada).

Comparando o coeficiente de atrito dos nanofluidos híbridos e do óleo POE, nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10, observa-se praticamente em todo o ensaio, que o nanofluido híbrido com concentração de 1,00 g/L apresenta valores um pouco menores que aqueles do fluido-base.

Da análise da Figura 4.11, verifica-se que óleo POE apresenta em todo o ensaio de lubricidade HFRR coeficiente de atrito menores do que aqueles dos nanofluidos simples Al₂O₃/POE.

Da análise da Figura 4.11, visualiza-se facilmente que o fluido-base apresenta também, em todo o ensaio de lubricidade HFRR, coeficiente de atrito menor do que aqueles dos nanofluidos simples Al₂O₃/POE com diferentes concentrações de nanopartículas sólidas imersas no meio líquido.

De forma análoga, o mesmo comportamento foi verificado na Figura 4.12 em que o óleo POE tem valores do coeficiente de atrito menores do que os nanofluidos simples MWCNTs/POE com diferentes concentrações de nanopartículas, durante todo ensaio de lubricidade HFRR.

Os ensaios de lubricidade HRFF do óleo POE e dos nanofluidos foram feitos em triplicata, para aumentar confiabilidade dos resultados. A Figura 4.13 mostra as menores escaras de desgaste (WSD) das esferas obtidas nos ensaios de lubricidade HFRR de cada nanofluido e do fluido-base.

O nanofluido híbrido apresentou o menor WSD de 173 µm para concentração de 0,25 g/L. O nanofluido simples de MWCNTs e o de Al₂O₃ apresentaram menor WSD de 132 µm e 166 µm nas concentrações de 1,00 g/L e 0,25 g/L, respectivamente.

O óleo POE apresentou o WSD 128 µm. Este WSD foi o melhor valor de escara de desgaste da esfera, não tendo sido superado por nenhum nanofluido submetido ao ensaio de lubricidade nas mesmas condições.

Em outras palavras, isto significa que os nanofluidos híbridos e simples desgastaram mais a esfera de aço do par tribológico do que o óleo POE de referência.

Figura 4.9 – Coeficiente de atrito do óleo POE e de nanofluidos híbrido (MWCNTs-Al₂O₃/POE) e simples (Al₂O₃/POE, MWCNTs/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L *versus* tempo

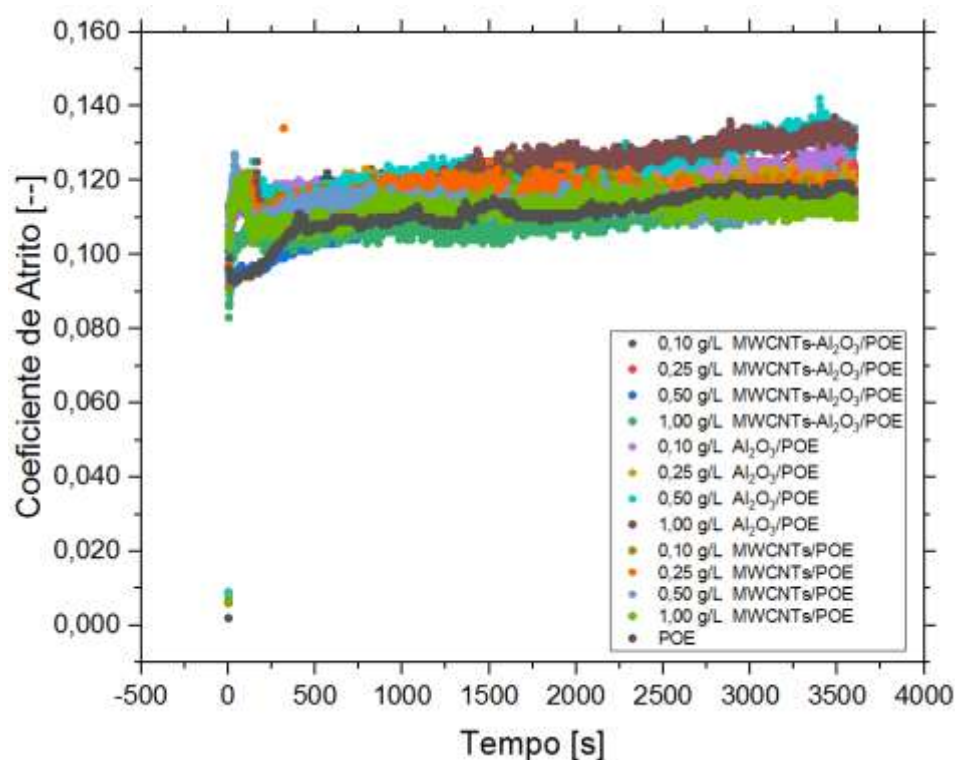


Figura 4.10 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluidos híbrido (MWCNTs-Al₂O₃/POE) com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L *versus* tempo

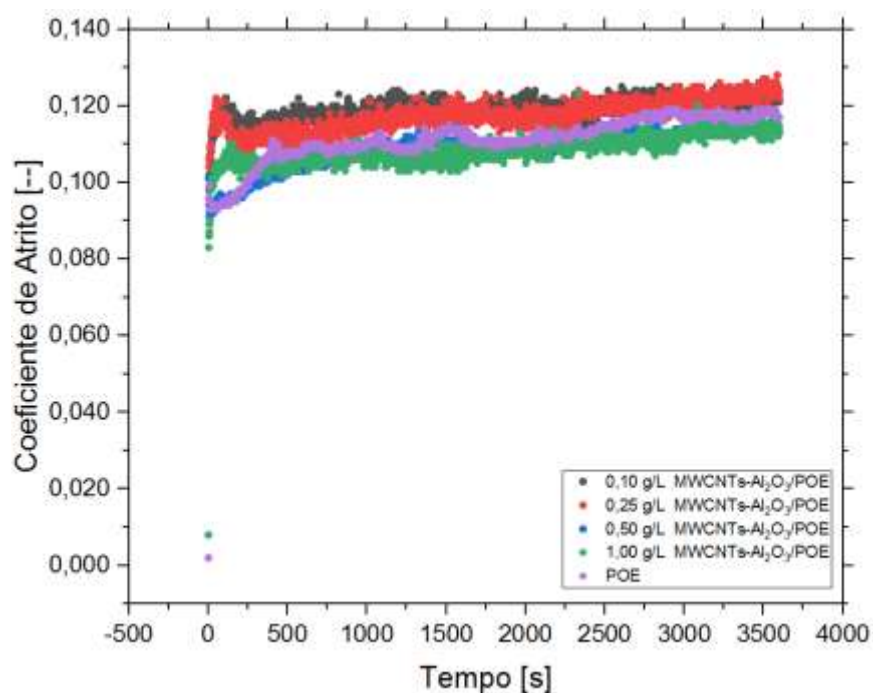


Figura 4.11 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluido simples Al₂O₃/POE, com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L *versus* tempo

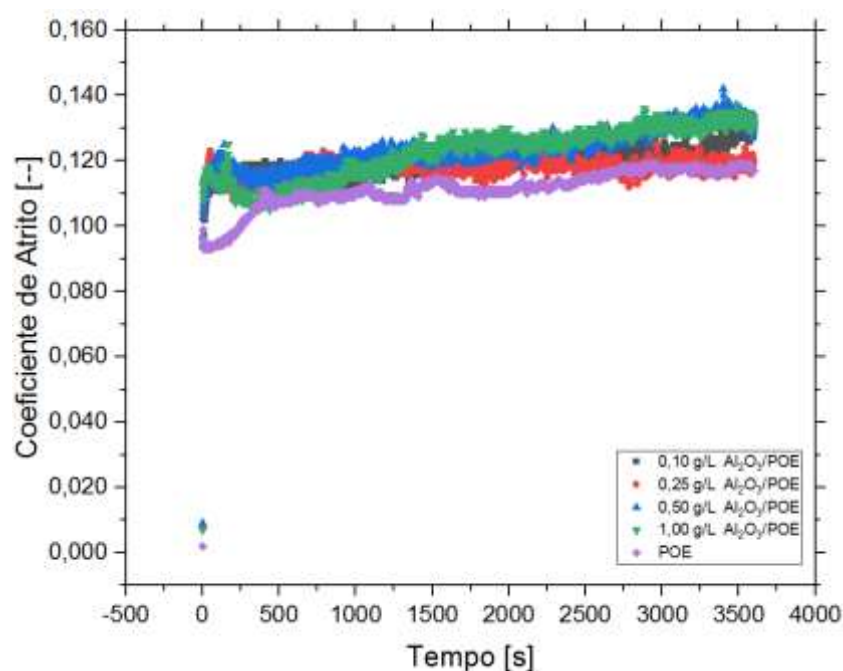


Figura 4.12 – Coeficiente de atrito do óleo POE e nanofluido simples MWCNTs/POE, com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L, 1,00 g/L *versus* tempo

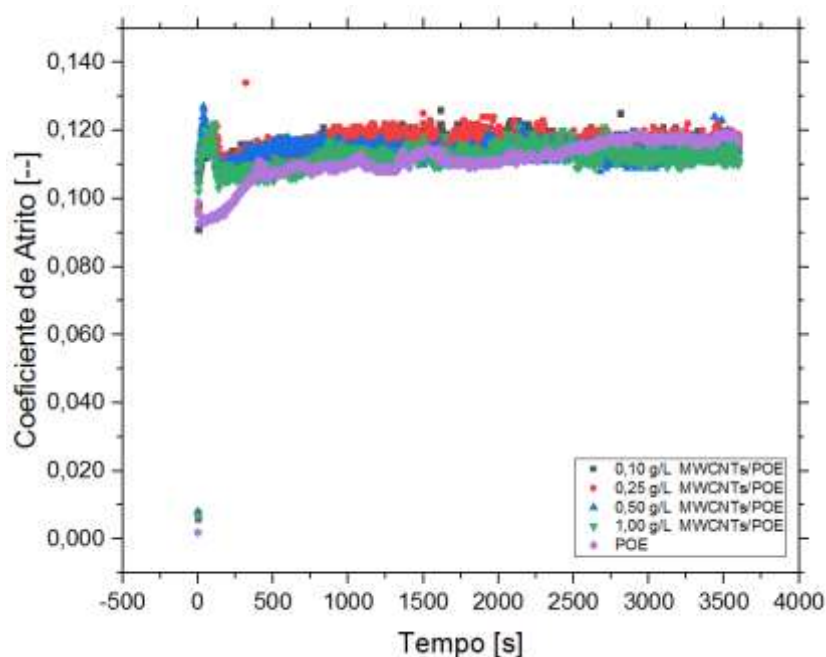


Figura 4.13 – Imagens das escaras de desgaste das esferas dos ensaios de lubricidade HFRR dos nanofluidos híbridos e simples em diferentes concentrações de nanopartículas

NANOFLUIDO	CONCENTRAÇÃO DAS NANOPARTICULAS (g/L)			
	0,10	0,25	0,50	1,00
MWCNTs-Al ₂ O ₃ -POE	 216µm 153µm WSD 185µm	 222µm 122µm WSD 172µm	 204µm 141µm WSD 173µm	 222µm 149µm WSD 186µm
MWCNTs/POE	 205µm 83µm WSD 144µm	 230µm 92µm WSD 161µm	 184µm 98µm WSD 146µm	 177µm 86µm WSD 132µm
Al ₂ O ₃ -POE	 238µm 170µm WSD 204µm	 204µm 128µm WSD 166µm	 232µm 110µm WSD 221µm	 250µm 237µm WSD 244µm
ÓLEO POE	 155µm 100µm WSD 128µm			

As nanopartículas de todas as amostras de nanofluido híbrido ensaiadas foram adicionadas ao óleo POE na proporção percentual de 50% de Al₂O₃ e 50% de MWCNTs.

5 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada possibilitou ampliar e aprofundar os conhecimentos teóricos associados às tecnologias de nanofluidos híbridos, sendo um fator determinante no refinamento da metodologia da pesquisa proposta inicialmente.

Considerando os resultados obtidos no escopo do estudo experimental sobre o nanolubrificante Al₂O₃-MWCNTs/POE, foi possível então se chegar as seguintes conclusões:

- 1) A preparação do nanofluido híbrido proposto pelo método de “dois passos” com utilização de técnicas de sonicação por ultrassom de imersão e agitação magnética das partículas em suspensão conferiu boas características de estabilidade, retardando a aglomeração e reduzida sedimentação das nanopartículas no fluido-base, conforme pode ser observado através do método de sedimentação por inspeção visual;
- 2) A automação dos ensaios de: condutividade térmica, viscosidade dinâmica e de lubricidade HFRR, possibilitou a reprodução dos testes de modo igual para todas as amostras de nanofluido, sem a interferência do operador, permitindo aumentar o nível de confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados obtidos.
- 3) Na faixa de temperatura 100C a 45 °C, a condutividade térmica de cada amostra de nanofluido praticamente se manteve praticamente constante. O comportamento normal, segundo a literatura, seria de crescimento da condutividade térmica com o aumento da temperatura.
- 4) A condutividade térmica do nanofluido híbrido com concentração de 1,00 g/L, na faixa estável de temperatura de 10 °C a 45 0C, foi ligeiramente superior aos valores do fluido-base nas mesmas temperaturas. No quesito de condutividade térmica, este foi o melhor desempenho entre todos os nanofluidos ensaiados.
- 5) Infere-se dos nanofluidos ensaiados uma tendência de intensificação da condutividade térmica com o aumento da concentração de nanopartículas sólidas no meio líquido. Esta tendência também está consoante com os dados da literatura;

- 6) A viscosidade dinâmica dos nanofluidos e do fluido-base ensaiados é muito sensível à variação da temperatura. Sua intensidade decresce com o aumento da temperatura. Este comportamento também é verificado na vasta literatura.
- 7) A viscosidade dinâmica dos nanofluidos híbridos e simples ensaiados manteve-se praticamente constante em toda faixa de temperatura e com uma variação desprezível em relação ao fluido-base. Este comportamento é muito importante para aplicação dos nanofluidos em processos de transferência de calor com convecção forçada, uma vez que não altera significativamente a potência de escoamento do fluido térmico;
- 8) No ensaio de lubricidade HFRR, o nanofluido híbrido com concentração de 1,0 g/L apresentou coeficiente de atrito menor e diâmetro da escara de desgaste (WSD) da esfera maior, comparativamente ao fluido-base.
- 9) O óleo POE (fluido-base) apresentou diâmetro da escara de desgaste (WSD) da esfera menor do que todos os nanofluidos ensaiados, muito embora o coeficiente de atrito tenha sido superior ao nanofluido híbrido na concentração de 1,00 g/L.
- 10) Finalmente, o nanofluido híbrido Al₂O₃-MWCNTs/POE, na concentração de 1,00 g/L, foi o que exibiu o melhor conjunto de propriedades termo-mecânicas entre todas as amostras de nanofluidos ensaiadas, tendo uma performance melhor em relação ao fluido-base nos quesitos de condutividade térmica e coeficiente de atrito.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na investigação experimental do nanofluido híbrido Al₂O₃-MWNTCs/POE foram estudados importantes aspectos de sua caracterização. Para continuidade da pesquisa, sugere-se novos estudos envolvendo principalmente:

- 1) A análise experimental de caracterização das propriedades termofísicas do nanofluido híbrido Al₂O₃-MWNTCs/POE com maiores concentrações de nanopartículas no fluido-base;
- 2) Análise de desempenho do nanofluido híbrido Al₂O₃-MWNTCs/POE na concentração de 1,00 g/L de nanopartículas sólidas em um sistema real de refrigeração por compressão de vapor;
- 3) Aplicação de outras nanopartículas híbridas ao óleo POE nas mesmas concentrações de nanopartículas sólidas estudadas nesta dissertação.

6 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M.; MALIK, S.R.; IQBAL, M.H.; SAJID, M.M.; SHAD, N.A.; HUSSAIN, S.Z.; RAZZAQ, W. e JAVED, Y. Sedimentation and stabilization of nano-fluids with dispersant. *Journal of colloids and surfaces A*. v. 554, p. 86-92.. 2018.
- ALI, M.K.A.; FUMING, P.; YOUNUS.; ABDELKAREEM. M.A.A.; ESSA, F.A.; ELAGOULZ, A. e XIANJUN, H. Fuel economy in gasoline engines Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricants additives. *Journal of Applied Energy*. V. 211, p. 461-478, (2018)
- ALI, M.K.A.; XIANJUN, H.; ABDELKAREEM, M.A.A.; GULZAR, M. e ELSHEIKH, A.H. Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti-friction/wear in automotive engines. *Journal of tribology international*. V. 124, p. 209-229, (2018)
- ALMEIDA, I. M. G. Análise tribo-termodinâmica da aplicação de nanopartículas de Al₂O₃ como aditivo lubrificante em compressor hermético de refrigeração. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015, 178 p.
- ALVES, S.M.; MELLO, V.S; FARIA, E.A.; e CAMARGO, A.P.P. Nanolubricants developed from tiny CuO nanoparticles. *Journal of tribology international*. V. 100, p. 263-271, 2018.
- ANGAYARKANNI, S.A.; PHILIP, J. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, v.225, p. 146–176, 2015.
- ASTM D6079-11 (2016), Standard Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by the High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR) (Método de Teste Padrão para Avaliar a Lubricidade de Diesel Combustíveis pelo Equipamento Recíproco de Alta Frequência). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, DOI: 10.1520/D6079-11R16, <www.astm.org>
- AZEVEDO, V. F. Análise termo-reológica de nanolubrificantes para compressores de refrigeração aditivados com nanotubos de carbono. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016, 146 p.
- BABU, J. A. R.; KUMAR, K. K.; SRINIVASA RAO, S. State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 551-565, 2017.
- CAVALCANTI, S. L. L. Desenvolvimento e caracterização de biolubrificante a partir do óleo de carnaúba aditivado com micropartículas e nanopartículas de grafite. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018, 104 p.
- EGGERS, J.R. e KABELAC, S. Nanofluids revisited. *Journal of Applied thermal engineering*. v. 106, p.1114-1126. 2016.
- DAI, W; KHEIREDDIN, B.; GAO, H. e LIANG, H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Journal of tribology international*. V. 102, p. 88-98, 2016.
- DANFOSS. Overview of oil types. Technical product news/ Commercial compressors, Engineering tomorrow. FRCC.EN..027.A4.02. 2015

DARDAN, E.; AFRAND, M. e ISFAHANI, A.H.M. Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. *Journal of applied thermal engineering*. V. (2017)

DARDAN, E.; AFRAND, M. e ISFAHANI, A.H.M. Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil pumping power. *Journal of applied thermal engineering*. v.109, p.524-534

DE OLIVEIRA, R.L. Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia, 2018, 250 p.

DEVENDIRAN, D. K., AMIRTHAM, V. A.; A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p 21-40, 2016.

ESFE, M. H.; ARANI, A.A.A.; MADADI, M.R. e ALIREZAIE, A study on rheological characteristics of nano-lubricants containing MWCNT-TiO₂ nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, v. 260, p. 229–236, 2018.

ESFE, M. H.; AFRAND, M.; YAN, W.M.; YARMAND, H.; TOGHRAIE, D. e DAHARI, M. Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO₂(20–80)-SAE40 hybrid nano-lubricant. *International communication in heat and mass transfer*. v. 76, p. 133-138. 2016

ESFE, M. H.; ARANI, A. A. A.; REZAIE, M.; YAN W.; KARIMIPOUR, A.; Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/ water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 66 p. 189-195, 2015.

ESFE, M. H.; ESFANDEH, S.; AMIRI, M.K. e AFRAND, M. A novel applicable experimental study on the thermal behavior of SWCNTs(60%)-MgO(40%)/EG hybrid nanofluid by focusing on the thermal conductivity. *Ptec* (2018), doi: 10.1016/j.powtec.2018.10.008

ESFE, M. H.; ROSTAMIAN, H.; SARLAK, M. R.; A novel study on rheological behavior of ZnO-MWCNT/10w40 nanofluid for automotive engines. *Journal of Molecular Liquids*, v. 254, p. 406–413, 2018.

ESFE, M. H.; RAHIMI, H.; EMAMI, M.R.S. e AFRAND, M. Viscosity and rheological properties of antifreeze based nanofluid containing hybrid nano-powders of MWCNTs and TiO₂ under different temperature conditions. *Journal of powder technology*. PTEC 13806. Doi: 10.1016/j.powtec.2018.10.032

FARIAS, A. C. M. Analise da Lubricidade do Biodiesel Brasileiro de Ésteres Etilícos de Soja e Girassol. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011, 143 p.

FARIAS, A. C. M. Lubricidade de biodiesel e sua associação com a vibração e nível de pressão sonora oriundos do contato esfera-plano sob deslizamento alternado. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015, 167 p. 69

FARIAS, A. C. M., SANTANA, J. S., OLIVEIRA FILHO, M.F., SANTANA, J. S., BARBOSA, C.R.F., MEDEIROS, J. T. N., Avaliação da Lubricidade do Óleo Biodiesel B5 e Óleos Vegetais de Coco e Mamona. In: 6°

CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande-PB. Anais do CONEM 2010.

FARIAS, A.C.M., SANTANA, J.S., OLIVEIRA FILHO, M.F., SANTANA, J.S., BARBOSA, C.R.F., MEDEIROS, J.T.N. Os combustíveis verdes do Brasil. Avaliação da lubrificidade do biodiesel B5 e óleos de mamona e coco. HOLOS, Ano 27, 2011, VOL.3.

GUPTA, M.; SINGH, V.; KUMAR, R.; SAID, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 638-670, 2017.

GUPTA, M.; SINGH, V.; KUMAR, S.; KUMAR, S.; DILBAGHI, N. e SAID, Z..Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids. Journal of Cleaner Production, v. 190, p. 169-192, 2018.

H. YARMAND, S. GHAREHKHANI, S.F.S. SHIRAZI, A. AMIRI, E. MONTAZER, H.K. ARZANI, et al., Nanofluid based on activated hybrid of biomass carbon/graphene oxide: synthesis, thermo-physical and electrical properties, Int. Commun. Heat Mass Transf. 72 10–15. 2016

HAMID, K.A.; AZMI, W.H.; NABIL, M.F.; MAMAT, R. e SHARMA, K.V. Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticles mixture ratios of TiO₂-SiO₂ nanofluids. International Journal of heat and mass transfer. V. 116, p. 1143-1152, 2018.

HAMZAH, M.H. et al. Factors affecting the performance of hybrid nanofluidos: A comprehensive review. International journal of heat and mass transfer, v. 115 630-646. 2017

HOLANDA, R.A.. Avaliação experimental de nanolubrificante híbrido composto de Al₂O₃ e grafite. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018, 126 p.

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; MARVENI, N. Preparation, Sedimentation and Agglomeration of Nanofluids. Chemical Engineering Technology, v. 37, p. 2011-2021, 2014.

KAKAVANDI, A. e AKBARI, M. Experimental investigation of thermal conductivity of nanofluids containing of hybrid nanoparticles suspended in binary base fluids and propose a new correlation. International journal of Heat and mass transfer. V. 124, p. 742-751. 2018.

KOCA, H. D.; DOGANAY, S.; TURGUT, A.; TAVMAN, I. H.; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, I. M. Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 1664-1674, 2018.

KHODADADI, H.; AGHAKHANI, S.; MAJD, H.; KALBASI, R.; WONGWISES, S. e AFRAND, M. A comprehensive review on rheological behavior of mono and hybrid nanofluids: Effective parameters and predictive correlations. International journal of heat and mass transfer. V 127, p. 997-1012. 2018

KUMAR DAS, P. A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. Journal of Molecular Liquids, v. 240, p. 420-446, 2017.

KUMAR, D.D e ARASU, A.V. A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids. Renewable and Sustainable energy reviews. Vol. 81, p. 1669-1689. (2018)

KUSZEWSKI, H.; JAWORSKI, A. e USTRZYCKI, A. Lubricity of ethanol–diesel blends – Study with the HFRR method. *Journal of fuel*. v. 208, p. 491-498. 2017.

LAAD, M. e JATTI, V.K. Titanium oxid nanoparticles as additives in engine oil. *Journal of king saud university – Engineering sciences*. V. 30, 116-122. (2018).

LEONG, K. Y.; AHMAD K. Z. K.; ONG, H. C.; GHAZALI, M. J.; BAHARU, A. Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nanofluids – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 868-878, 2017.

MARÍN, R.R.R.; BABICK, F. e STINTZ M. Ultrasonic dispersion of nanostructured materials with probe sonication – practical aspects of sample preparation. *Journal powder technology*. v. 318, p. 451-458. 2017.

MOTAHARI, K.; MOGHADDAM, M.A. e MORADIAN, M. Experimental investigation and development of new correlation for influences of temperature and concentration on dynamic viscosity of MWCNT/SiO₂(20-80)-20W50 hybrid nano-lubricant. *Chinese journal of chemical engineering*. v. 26, p. 152-158. 2018.

MURSHED, S.M.S.; ESTELLE, P. A state of the art review on viscosity of nanofluids. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Review*, v. 76, p. 1134–1152, 2017.

NABIL, M.F.; AZMI, W.H.; HAMID, K.A.; ZAWAWI, N.N.M.; PRIYANDOKO, G.; MAMAT, R. Thermo-physical properties of hybrid nanofluids and hybrid nanolubricants: A comprehensive review on performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 83, p. 30–39, 2017.

NADOOSHAN, A. A.; ESFE, M. H.; AFRAND, M. Prediction of rheological behavior of SiO₂-MWCNTs/10W40 hybrid nanolubricant by designing neural network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 131, p. 2741–2748, 2018.

OLIVEIRA, G. A.; MENEZES, R. D.; BANDARRA FILHO, E. P. Comparação de Resultados Experimentais para a Condutividade Térmica de Nanofluidos. XVII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Viçosa, MG. 2010.

PCS INSTRUMENTS .High frequency reciprocating rig – HFRR. Brochure. 2014.

RAJENDHRAN, N.; PALANISAMY,S.; SHYMA, A.P. e VENKATACHALAM, R . Enhancing the termal and tribological performance of gear oil using Ni-promoted ultrathin MoS₂ nanocomposites. *Journal of Tribology International*. Vol 124, p. 156-158, 2018.

RAMACHANDRAN, R. N.; GANESAN, K.; ASIRVATHAM, L. G. The role of hybrid nanofluids in improving the thermal characteristics of screen mesh cylindrical heat pipes. *Thermal Science*, v. 20, n. 6, p. 2027-2035, 2016.

RAMACHANDRAN, R.; GANESAN, K.; RAJKUMAR, M. R.; ASIRVATHAM, L. G.; WONGWISES, S. Comparative study of the effect of hybrid nanoparticle on the thermal performance of cylindrical screen mesh heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 76, p. 294-300, 2016.

RASHEED, ABDUL KHALIQ (2017) Heat transfer, tribology and performance of graphene nanolubricants in an IC engine. PhD thesis, University of Nottingham, 2017. 234 p.

SAJID, M.U. e ALI, H.M. Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. *Internacional journal of heat and mass transfer*. V. 126, 211-234, (2018).

SARKAR, J.; GHOSH, P. e ADIL, A. A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications. *Journal of Renewable and sustainable energy reviews*. Vol. 43, p. 164-177. 2015

SHAHSAVAR, A. e BAHIRAEI, M. Experimental investigation and modeling of thermal conductivity and viscosity for non-Newtonian hybrid nanofluid containing coated CNT/Fe₃O₄ nanoparticles. *Journal of powder technology*. v. 318, p. 441-450. 2017.

SHARIF, M.Z.; AZMI, A.H.; MAMAT, R. e SHAFUL, A.I.M. Mechanism for improvement in refrigeration system performance by using nanorefrigerants and nanolubricants: An review. *International comunicatios in heat and mass transfer*. v. 92, p. 56-63. 2018.

SHELKE, S. A.; GOHEL, N. S. Heat Transfer Performance of a Vertical Thermosyphons Heat Pipe Heat Exchanger using Hybrid Nanofluid for Automobile Engine Exhaust Heat. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2016.

SIDIK, N.A.C; MOHAMMED,H.A; ALAWI, O.A. e SAMION, S. A review on preparation methods and challenges of nanofluids.*Journal of international communications in heat and mass transfer*. V.54, p. 115-125, 2014

SOUSA E. H. V. Obtenção e caracterização de nanolubrificantes utilizados em refrigeração aditivados com nanopartículas de Índio (In). Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017, 197 p.

SUGANTHI, K.S. e RAJAN, K.S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties,mechanisms, and heat transfer performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 226–255, 2017.

SUNDAR, L. S.; SHARMA, K. V.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 185-198, 2017.

TAWFIK, M.M. Experimental studies of nanofluid ternal conductivity enhancement and applications: A review. *Journal of renewable and sustainable energy reviews*. V. 75, p. 1239-1253. 2017.

USSA, A.P. Tungsten disulfide nanoparticles as lubricant additives for the automotive industry. These de L' Université de Lyon. Laboratoire de tribology et dynamique des systèmes. p.164. 2016.

VAKIS, A.I.; YASTREBOV, V.A;SCHEIBERT, J.; NICOLA,I.; DINI, D.; MINFRAY, C.; ALMQVIST, A.; PAGGI, M.; LEE, S.; LIMBERT,G.; MOLINARI, J.F.; ANCIAUX,G.; AGHABABAEI,R.; RESTREPO, S.E.; PAPANGELO, A.; CAMMARATA, A.; NICOLINI, P.; PUTGNANO, C.; CARBONE, G.; SPUUTKIEWICZ, S.; LENGIEWICZ, J.; COSTAGLIOLA, G.; BOSIA, F.; GUARINO, R.; PUGNO, N. M.; MUSER,M.H.; E CIAVARELLA, M. Modeling and simulation in tribology across scales: An overview. *Journal of tribology international*. V. 125, p. 169-199, 2018.

VENKATARAMANA BONU, NIRANJAN KUMAR, ARINDAM DAS, SITARAM DASH, AND ASHOK KUMAR TYAGI. Enhanced Lubricity of SnO₂ Nanoparticles Dispersed Polyolester Nanofluid. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2016 55 (10), 2696-2703.

YARMAND, H.; GHAREHKHANI, S.; AHMADI, G.; SHIRAZI, S. F. S.; BARADARAN, S.; MONTAZER, E.; ZUBIR, M. N. M.; ALEHASHAM, M. S.; KAZI, S. N.; DAHARI, M. Graphene nanoplatelets–silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer. *Energy Conversion and Management*, v. 100, p. 419–428, 2015.

YU, F.; CHEN, Y.; LIANG, X.; XU, J.; LEE, C.; LIANG, Q. e TAO, P. Dispersion stability of thermal nanofluids. *Progress in natural science: Materials international*. Vol. 27, p. 531-542, 2017.

YU, W.; FRANCE, D. M.; ROUTBORT, J. L.; CHOI, S. U. S. Review and Comparison of Nanofluids Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements. *Heat Transfer Engineering*, v. 29, p. 432-460, 2008.

XU, Y.; WANG, Q.; HU, X.; LI, C. e ZHU, X. Characterization of the lubricity of bio-oil_diesel fuel blends by high frequency reciprocating test rig. *Journal of Energy*. v. 35, p. 283-287. 2010.

ZAWAWI, N.N.M.; AZMI, W.H.; REDHWAN, A.A.M.; e SHARIF, M.Z. Thermo-physical properties of metal oxides composite nanolubricants. *Journal of mechanical engineering*. V. SI 5(1), 28-38. 2018.

7 APÊNDICES

Todas as informações contidas neste apêndice foram essenciais no desenvolvimento da pesquisa experimental e são indispensáveis à compreensão do texto principal desta dissertação.

7.1 APÊNDICE A – Condutividade térmica das amostras de nanofluidos híbrido, simples e do fluido base com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L no intervalo de temperatura de 10 °C a 50 °C.

7.2 APÊNDICE B – Viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos híbrido, simples e do fluido base com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L no intervalo de temperatura de 20 °C a 80 °C.

7.3 APÊNDICE C – Resistividade térmica das amostras de nanofluidos híbrido, simples e do fluido base com concentração de 0,10 g/L, 0,25 g/L, 0,50 g/L e 1,0 g/L no intervalo de temperatura de 10 °C a 50 °C.

APÊNDICE A

Figura A.1 – Condutividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,1 g/L *versus* temperatura

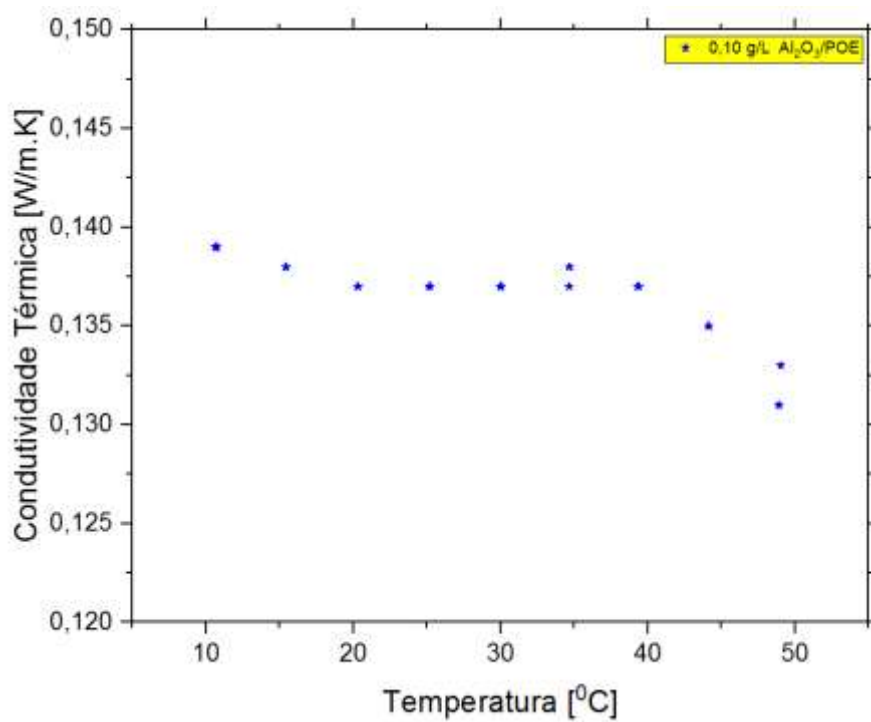


Figura A.2 – Condutividade térmica do nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

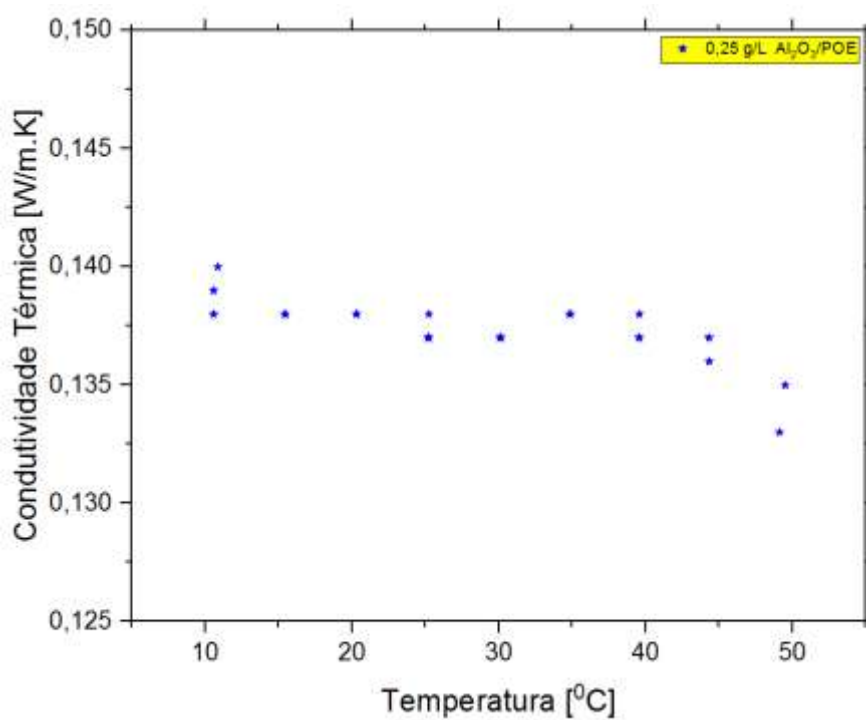


Figura A.3 – Condutividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

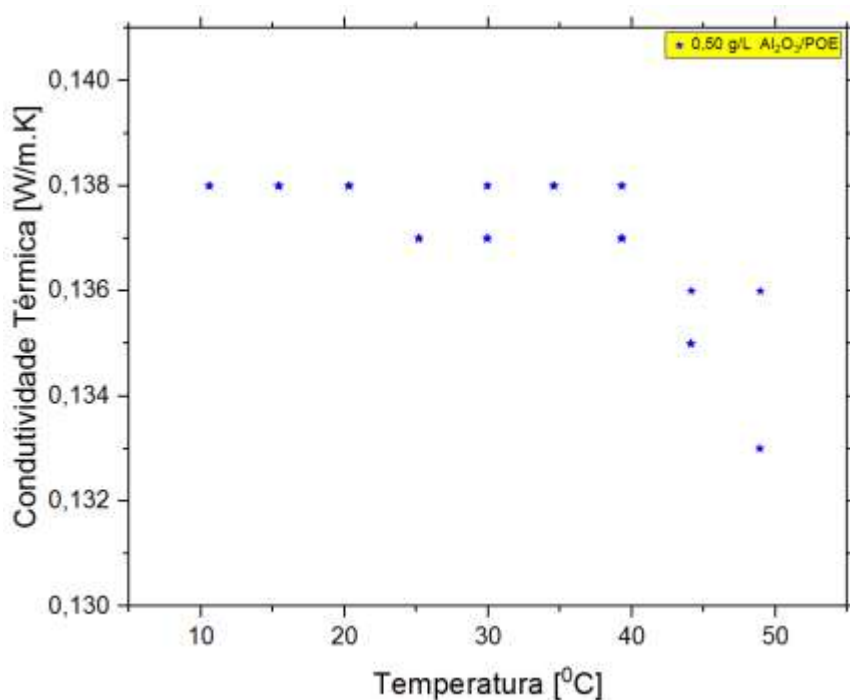


Figura A.4 – Condutividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura

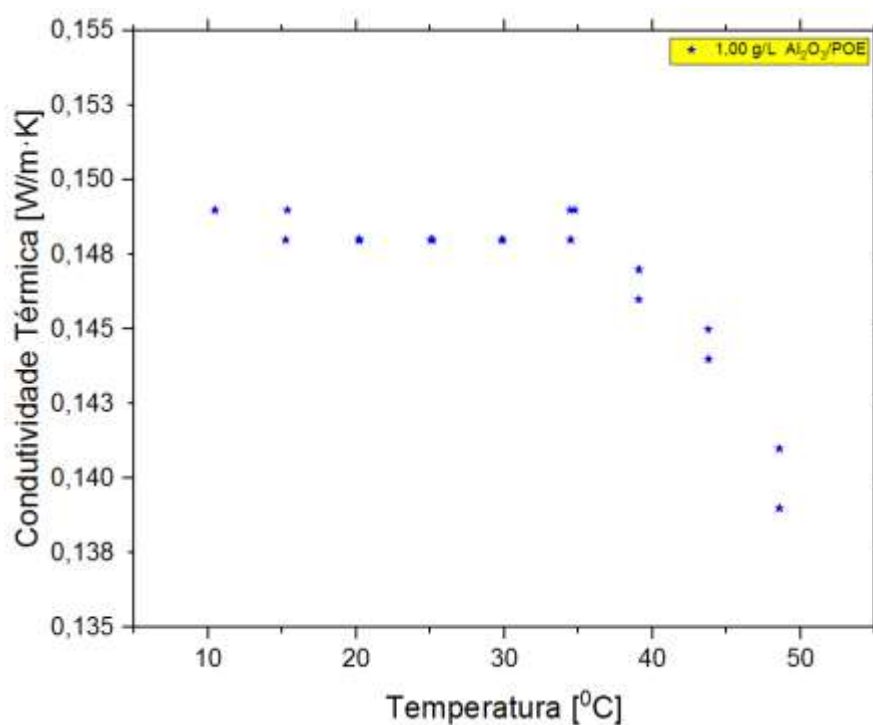


Figura A.5 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

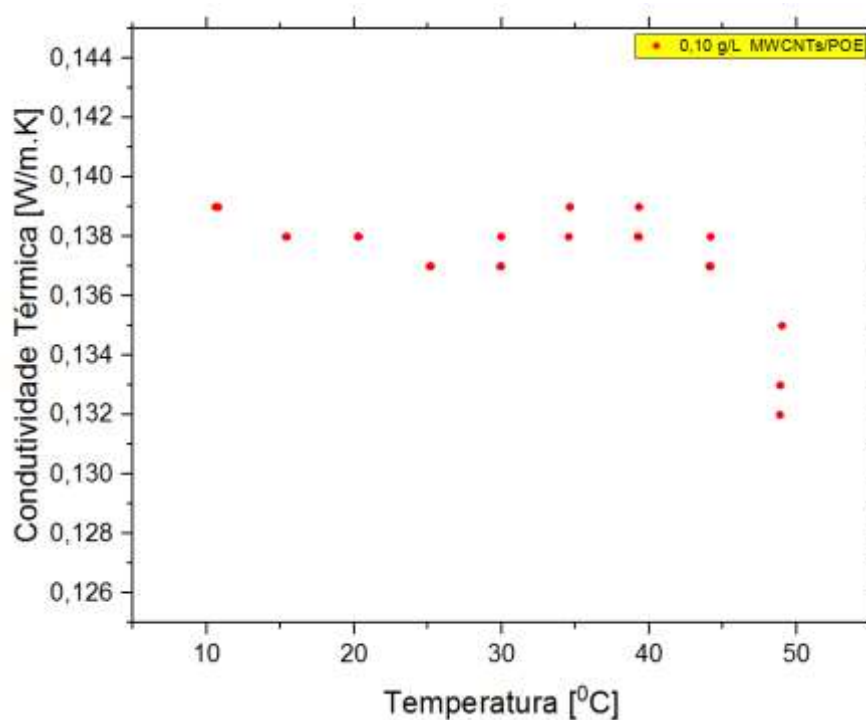


Figura A.6 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

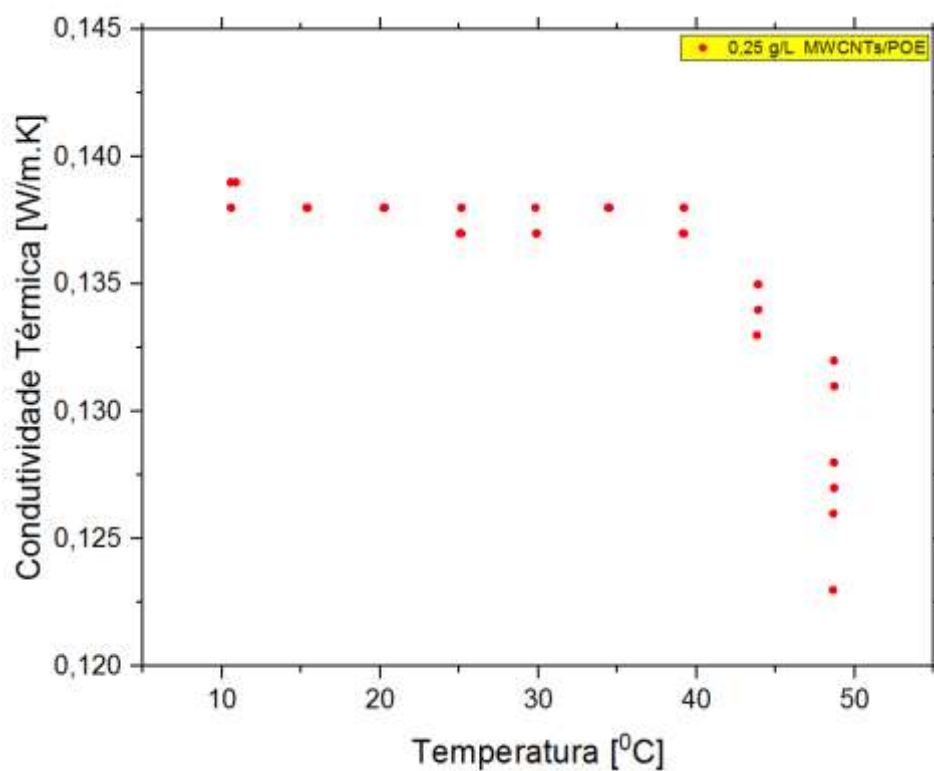


Figura A.7 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

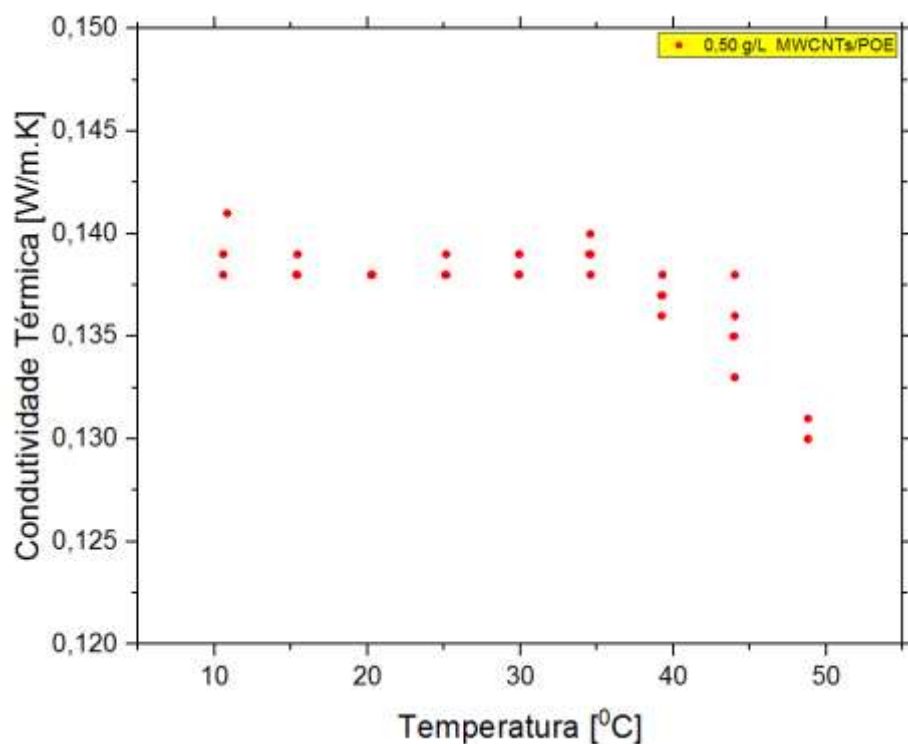


Figura A.8 – Condutividade térmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura

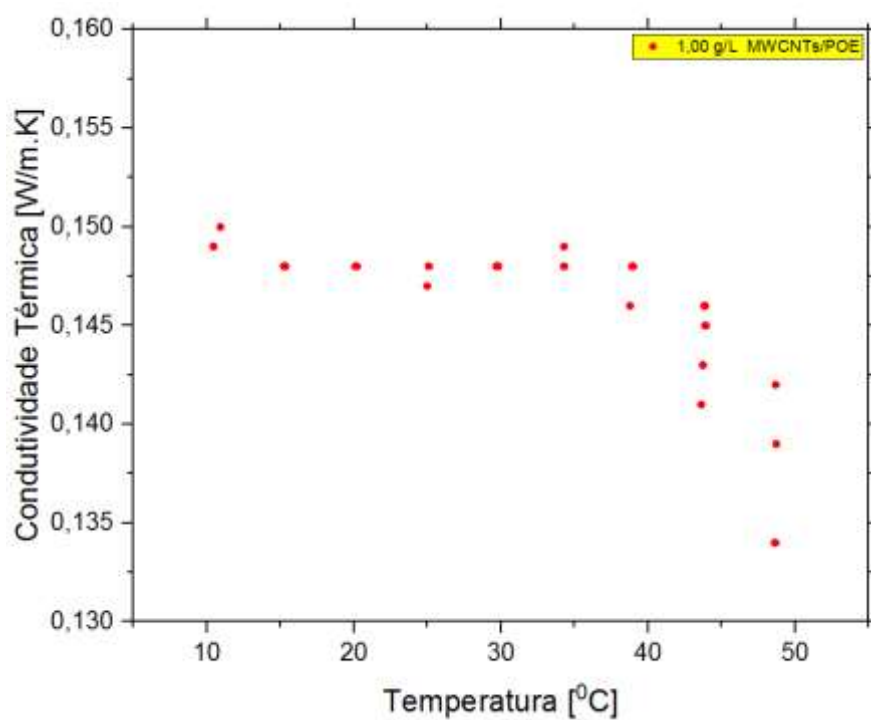


Figura A.9 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,1 g/L *versus* temperatura.

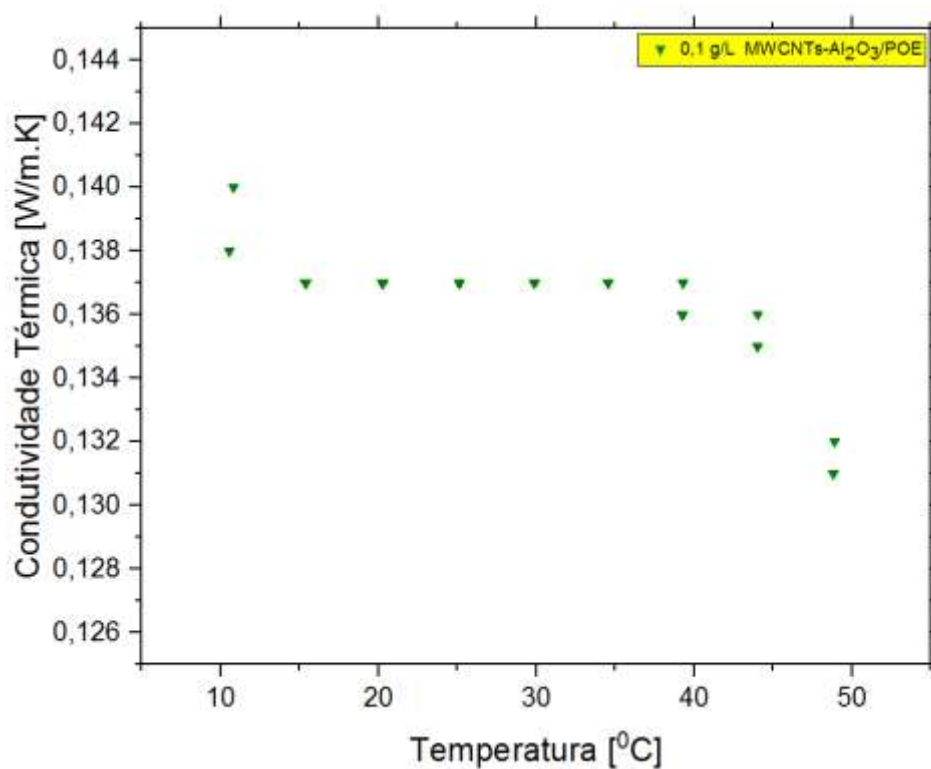


Figura A.10 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

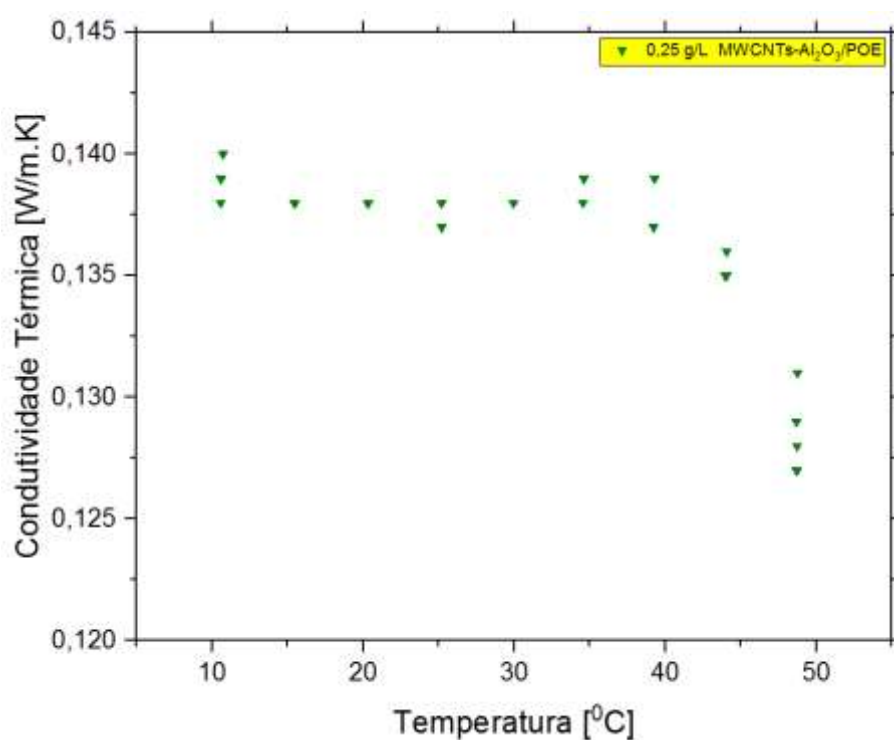


Figura A.11 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura.

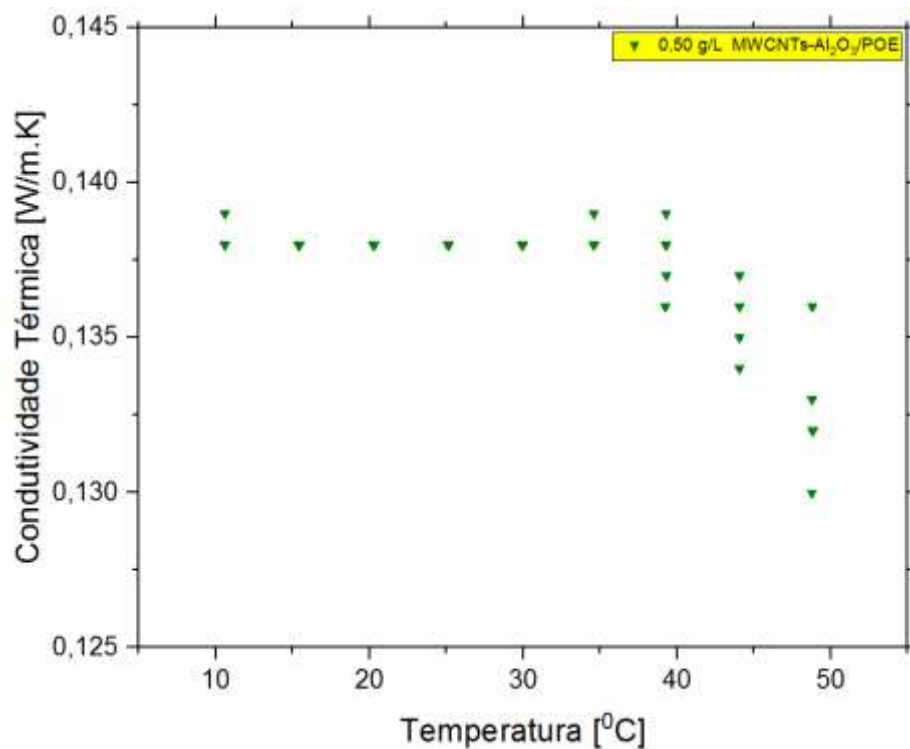


Figura A.12 – Condutividade térmica do MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura.

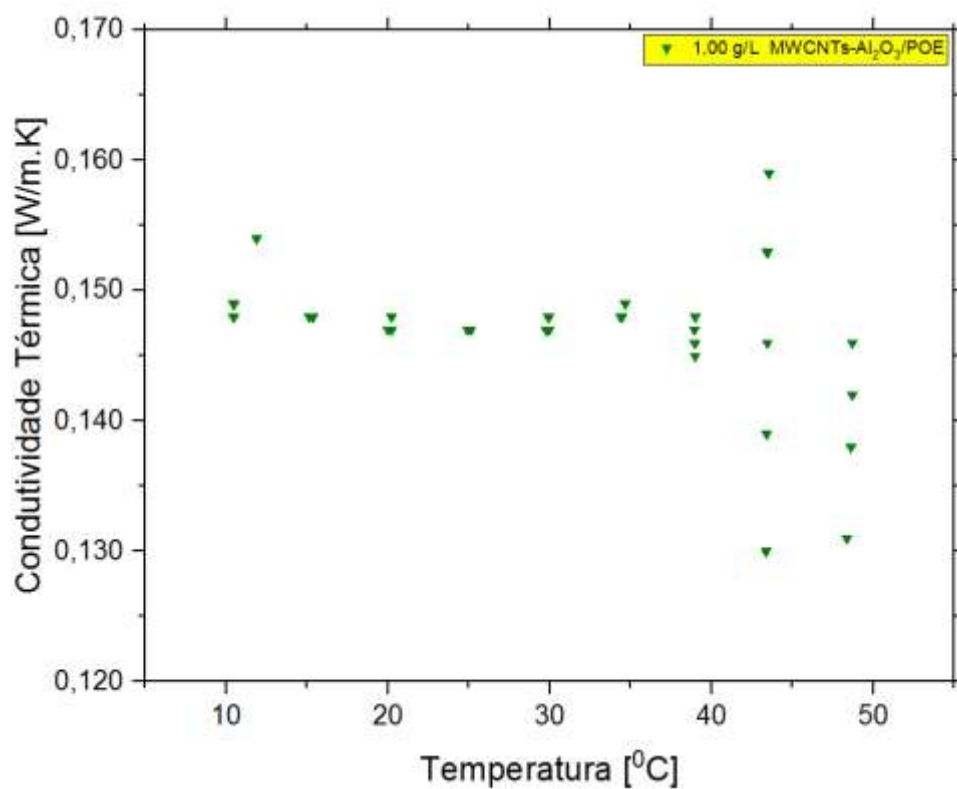
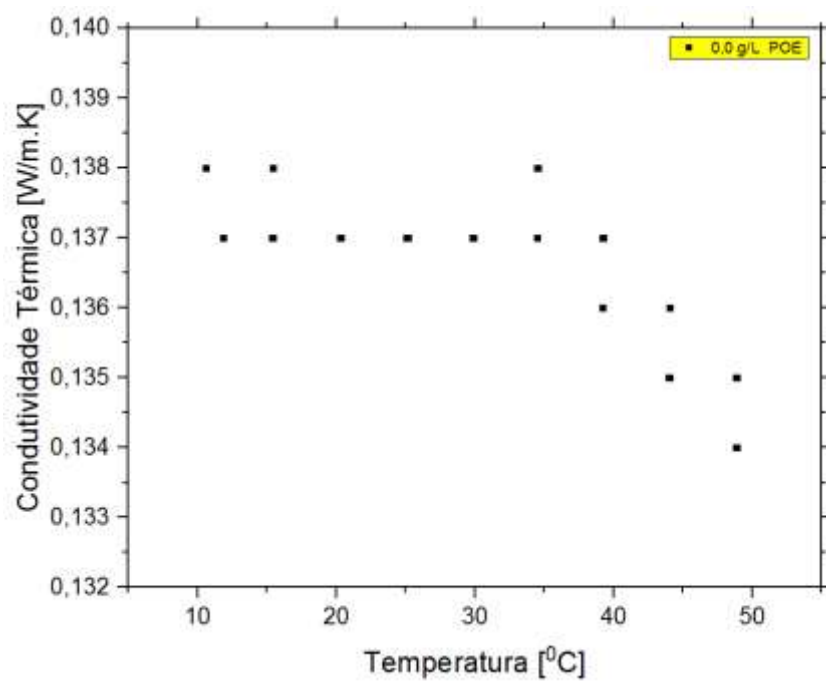


Figura A.13 – Condutividade térmica óleo POE puro *versus* temperatura.

APÊNDICE B

Figura B.1 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

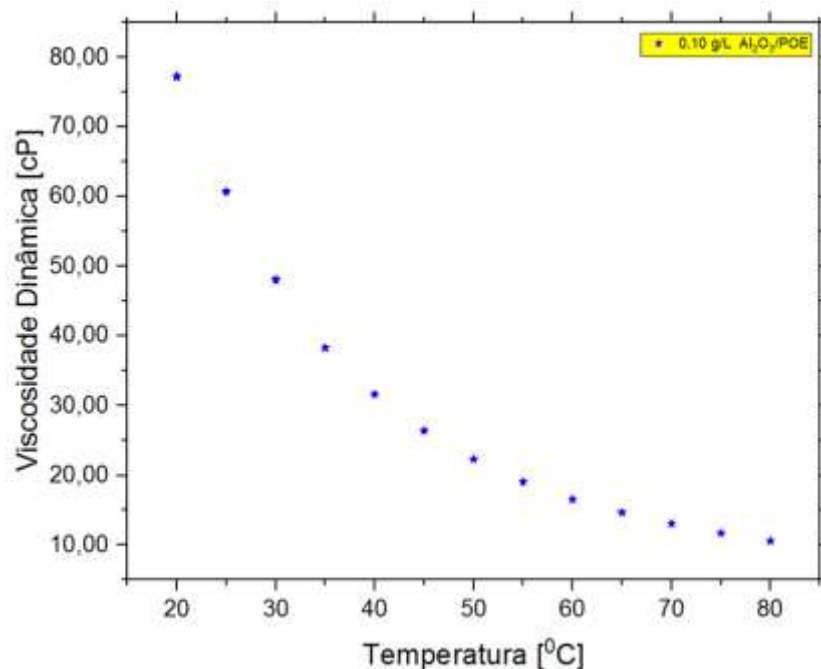


Figura B.2 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

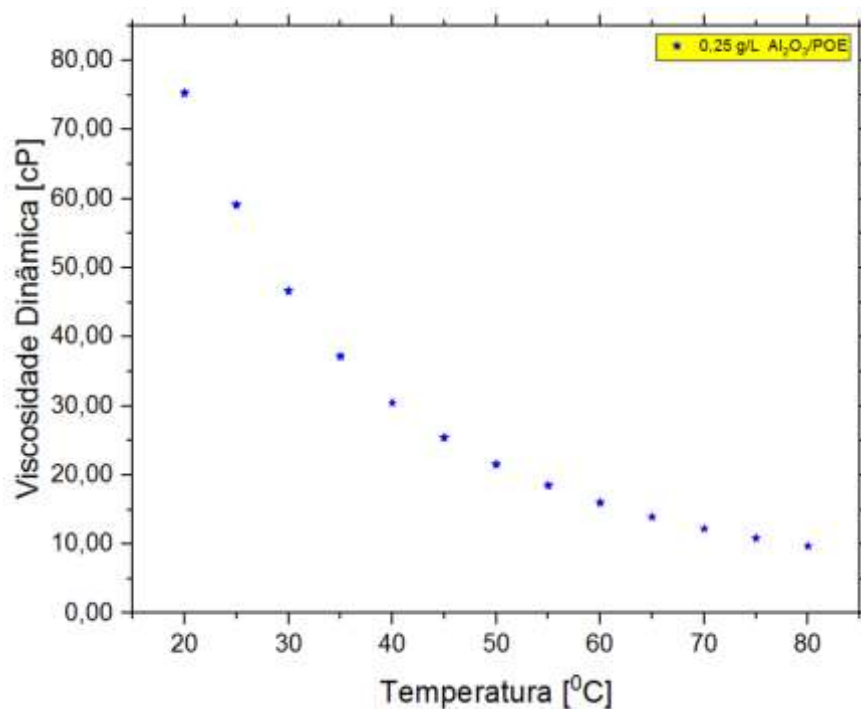


Figura B.3 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

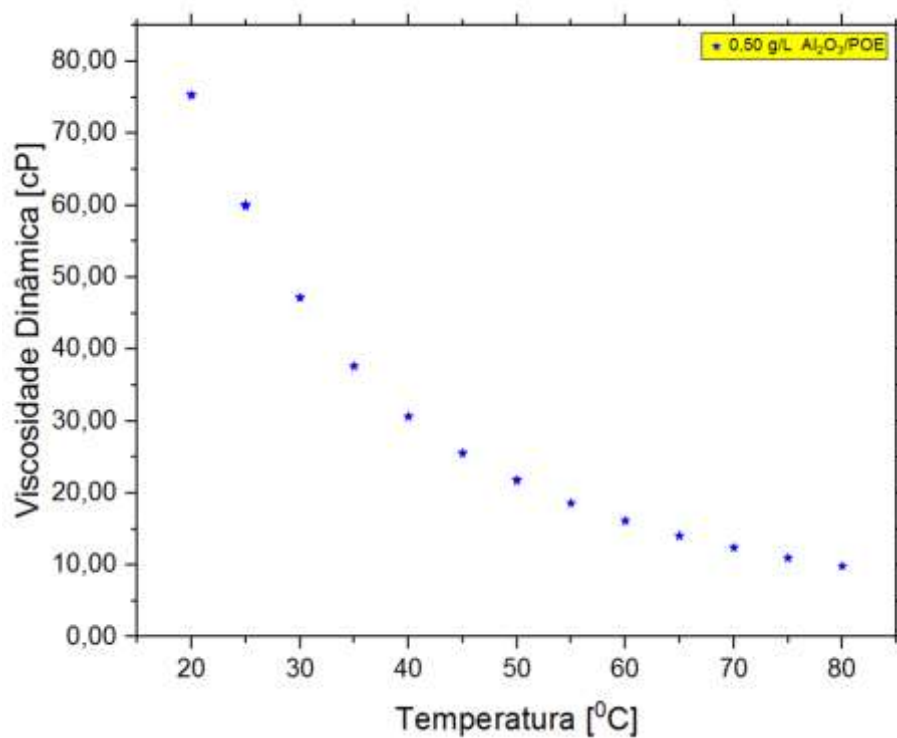


Figura B.4 – Viscosidade dinâmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 1,0 g/L *versus* temperatura

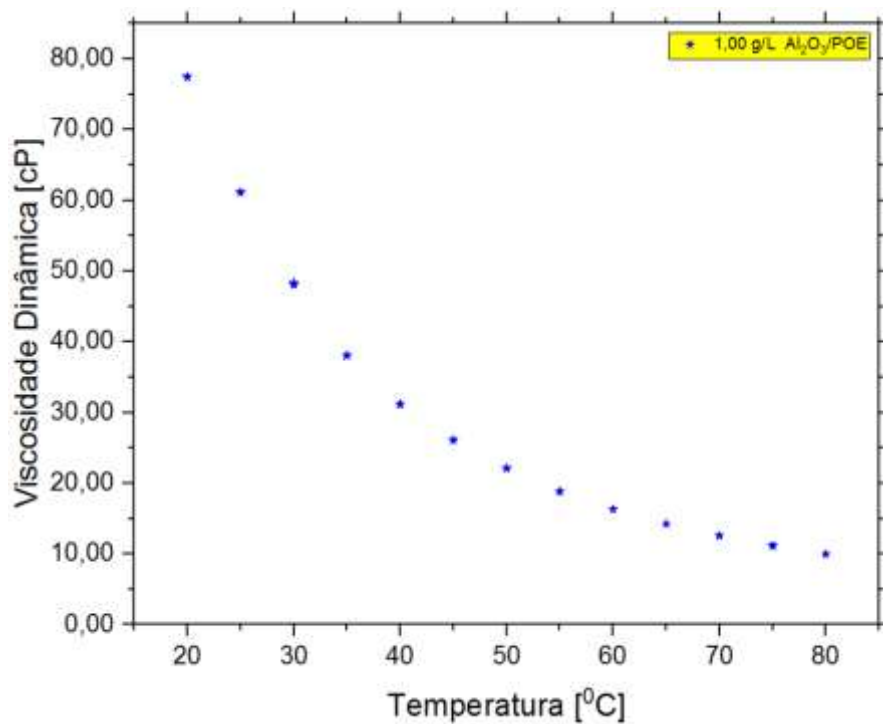


Figura B.5 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

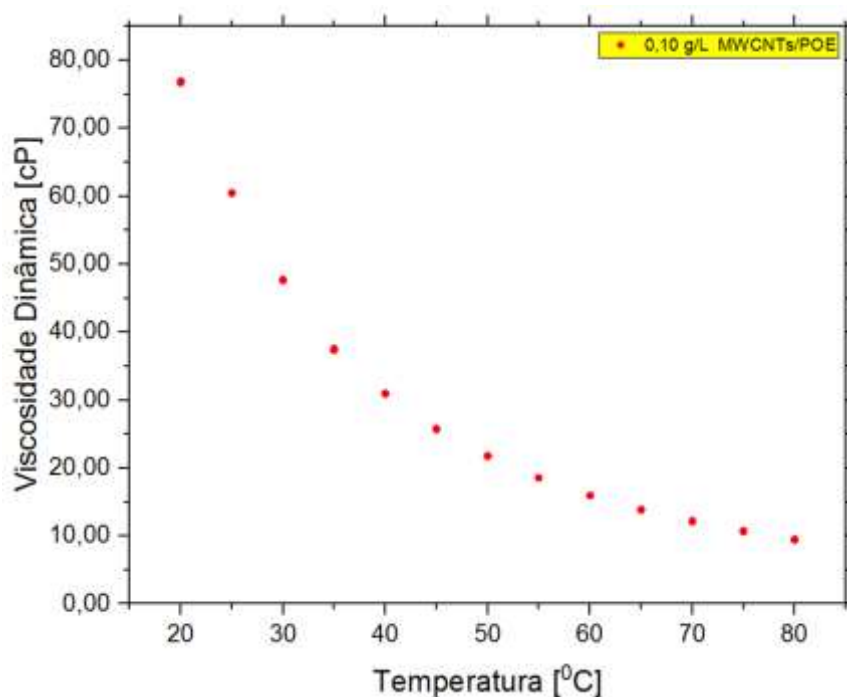


Figura B.6 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

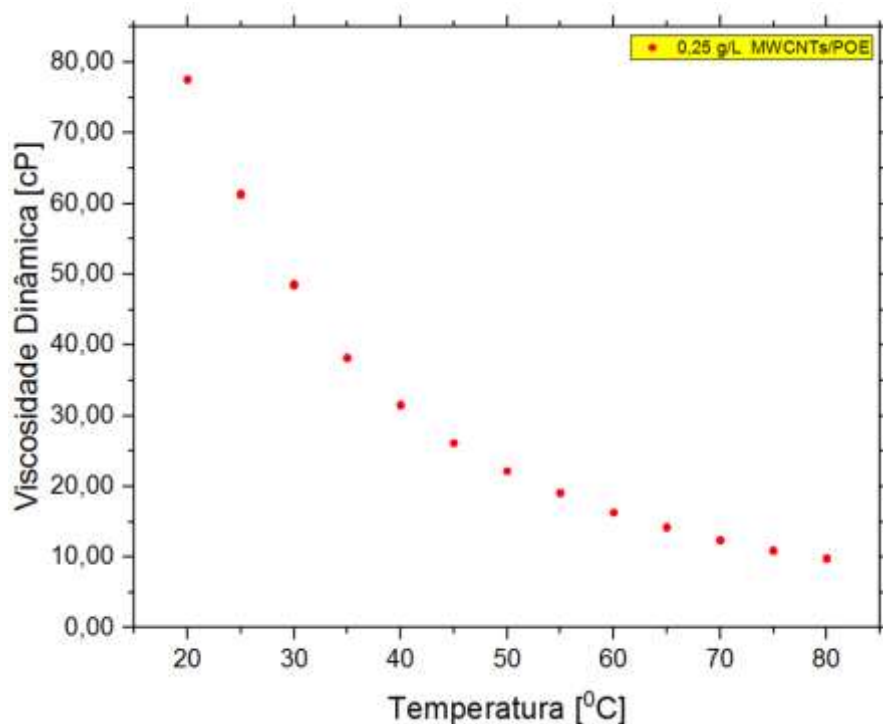


Figura B.7 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

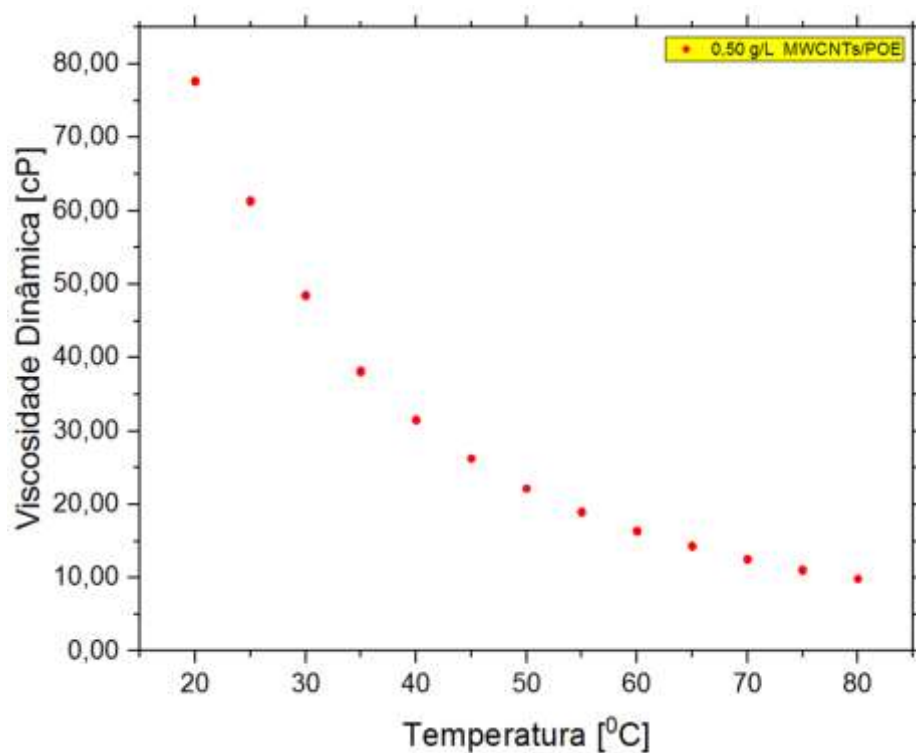


Figura B.8 – Viscosidade dinâmica do nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,0 g/L *versus* temperatura

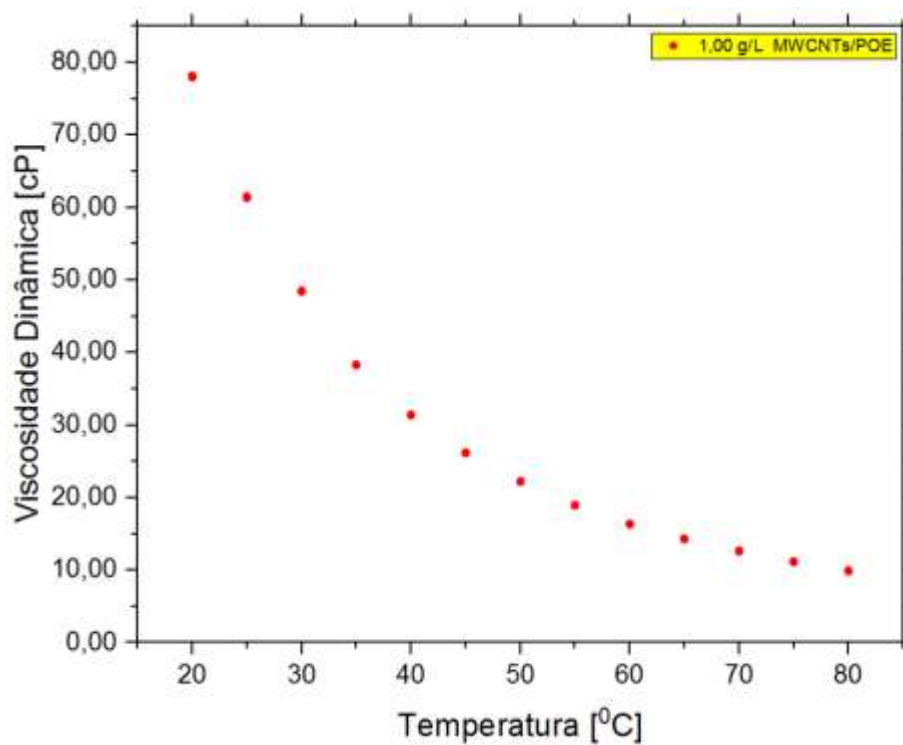


Figura B.9 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,1 g/L *versus* temperatura.

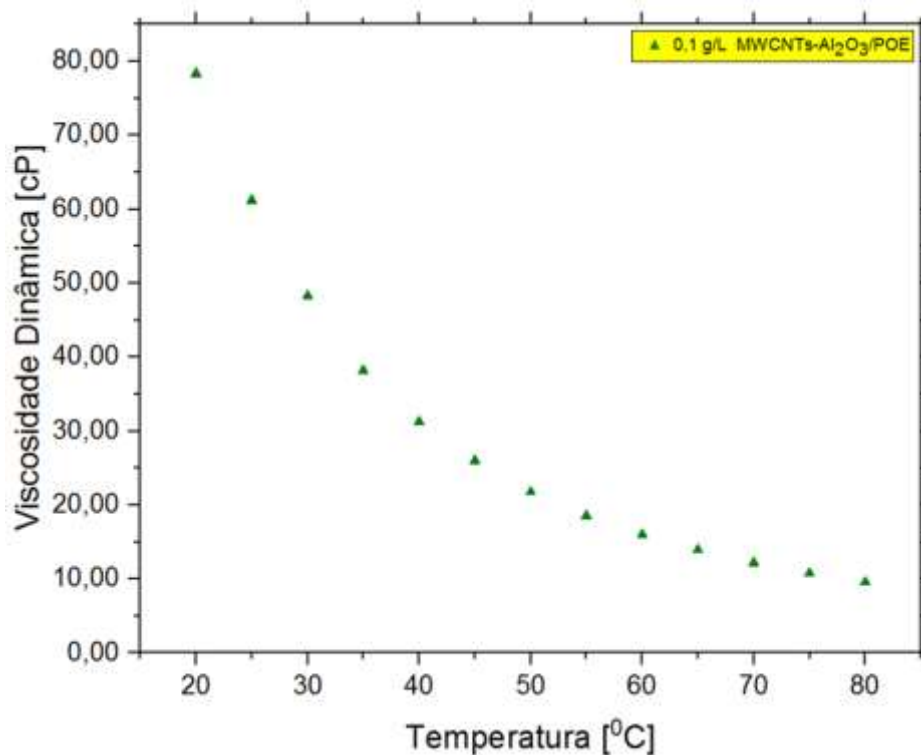


Figura B.10 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura.

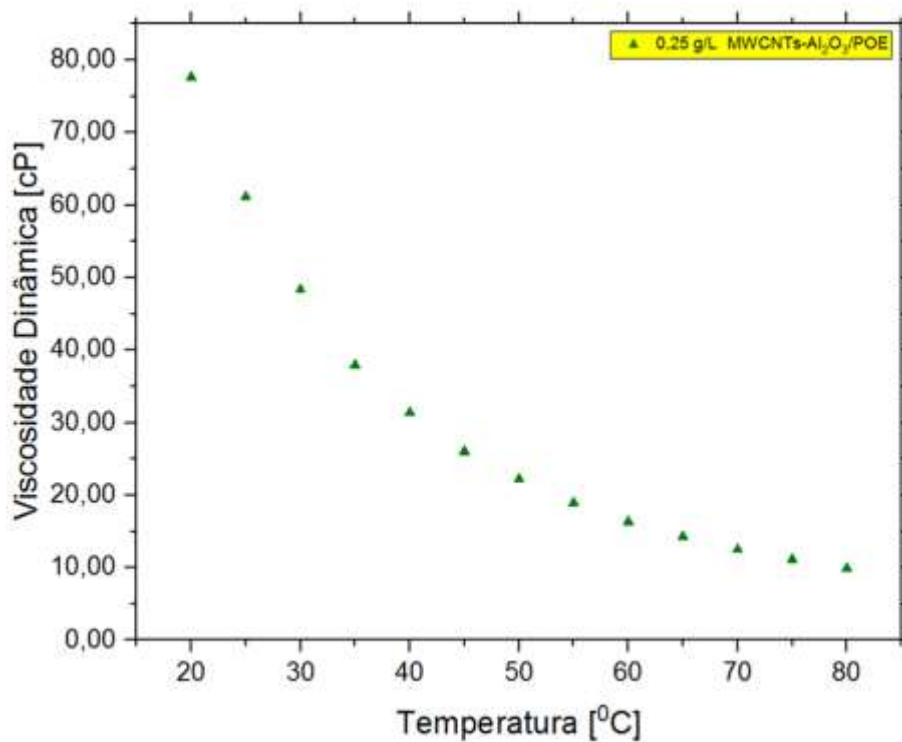


Figura B.11 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura.

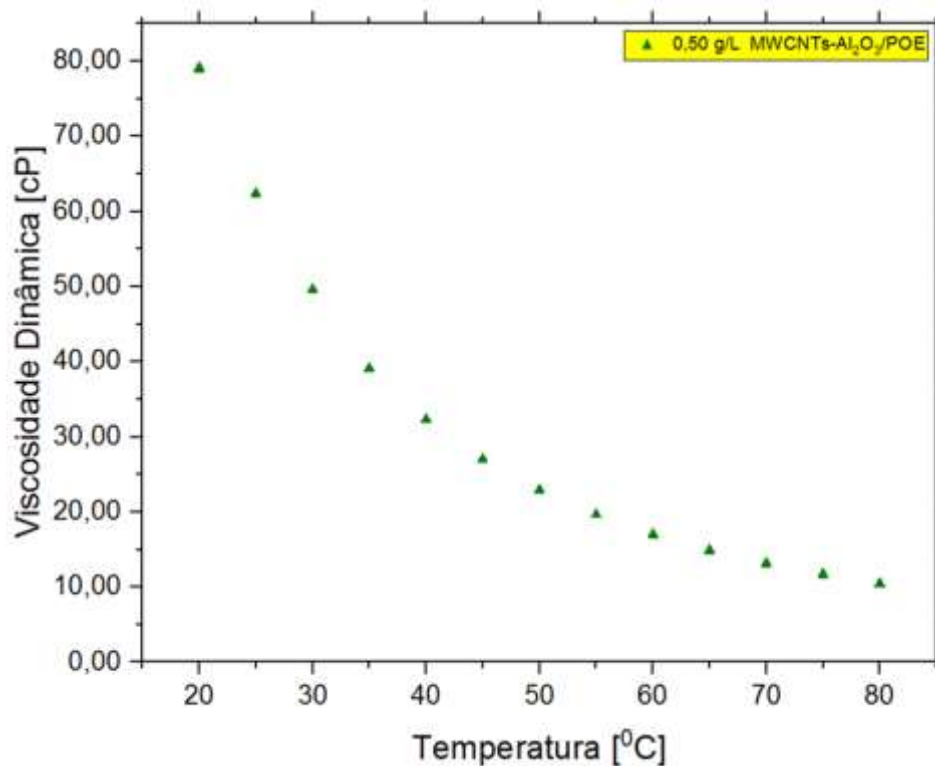


Figura B.12 – Viscosidade dinâmica do nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE com concentração de 1,0 g/L *versus* temperatura.

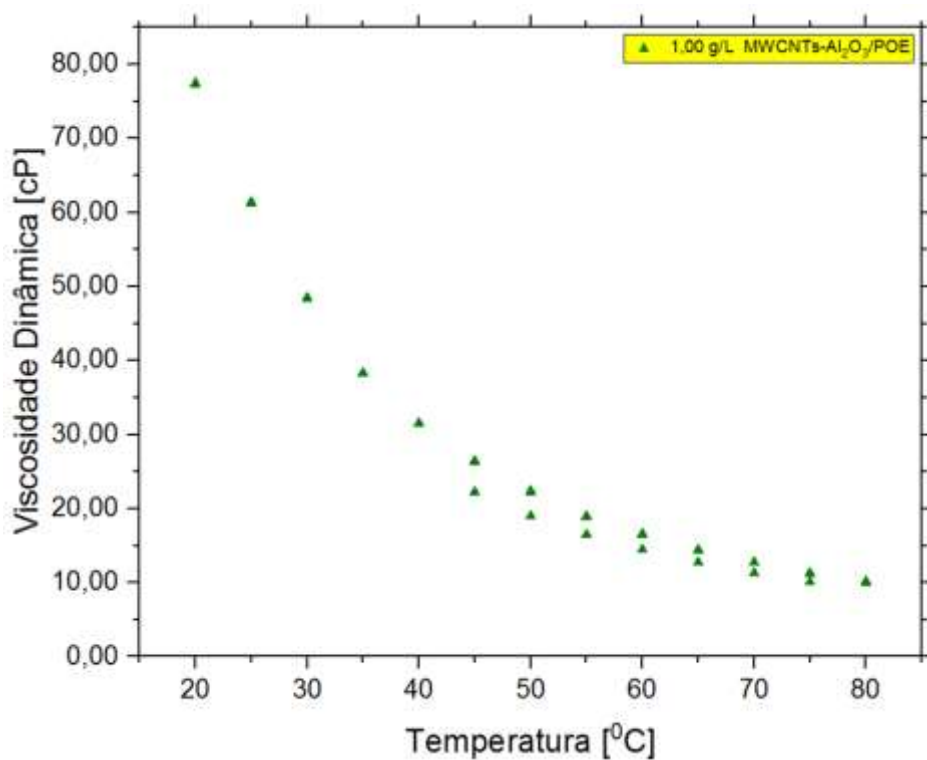
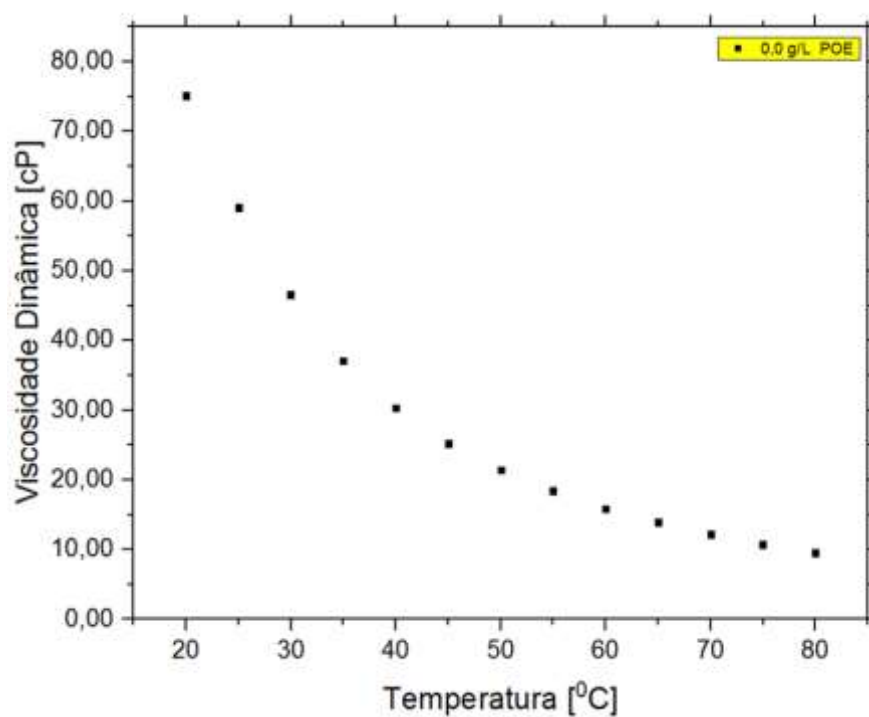


Figura B.13 – Viscosidade dinâmica do óleo POE puro *versus* temperatura

APÊNDICE C

Figura C.1 – Resistividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

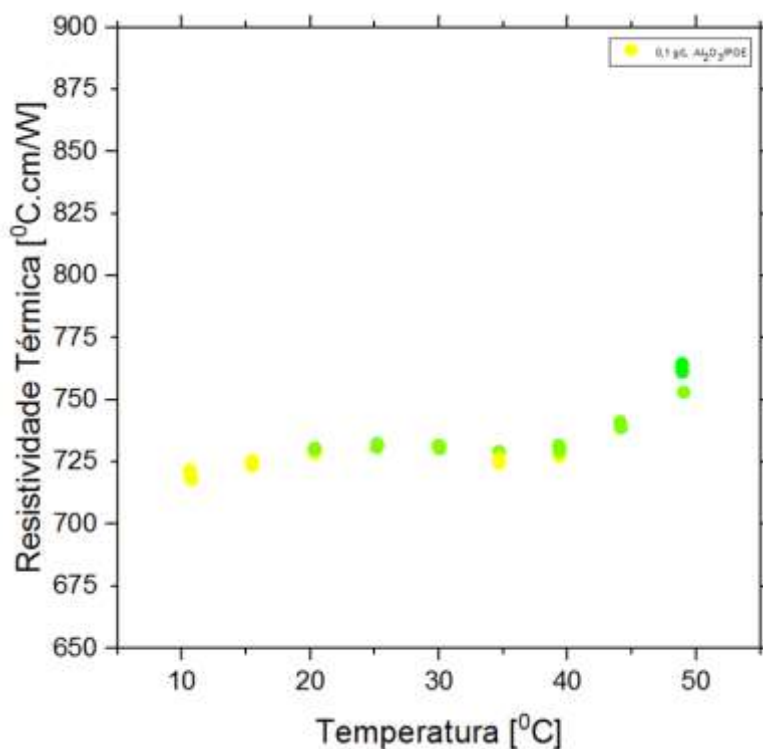


Figura C.2 – Resistividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

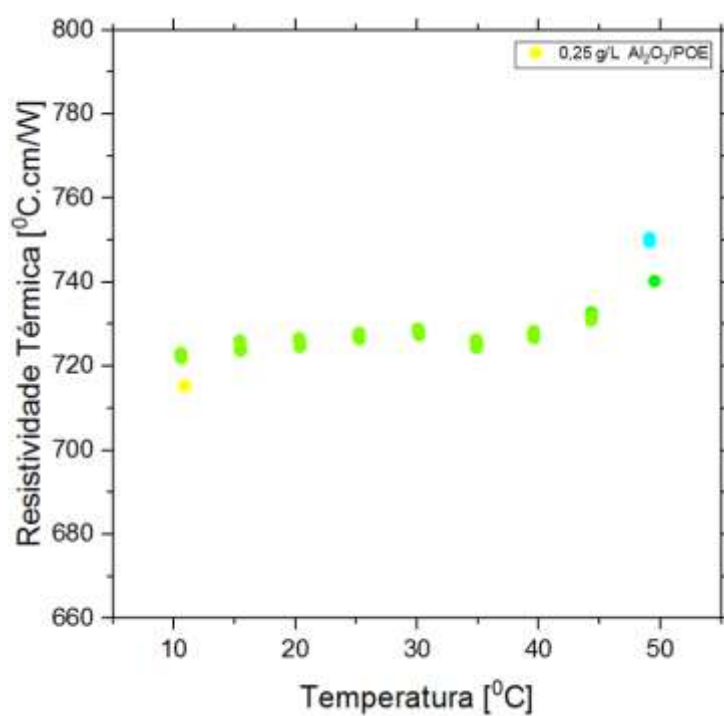


Figura C.3 – Resistividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

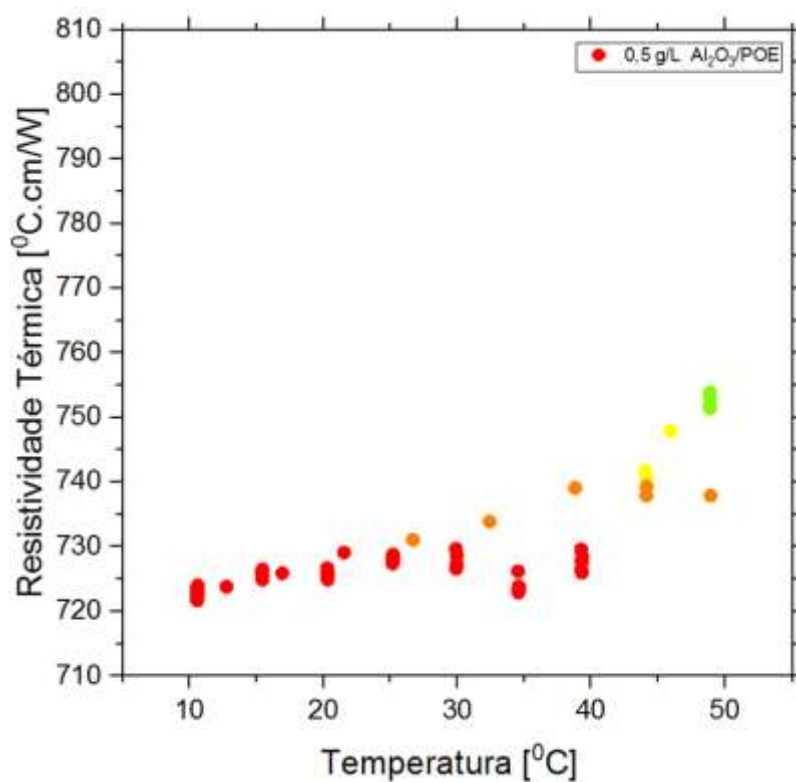


Figura C.4 – Resistividade térmica de nanofluido Al₂O₃/POE na concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura

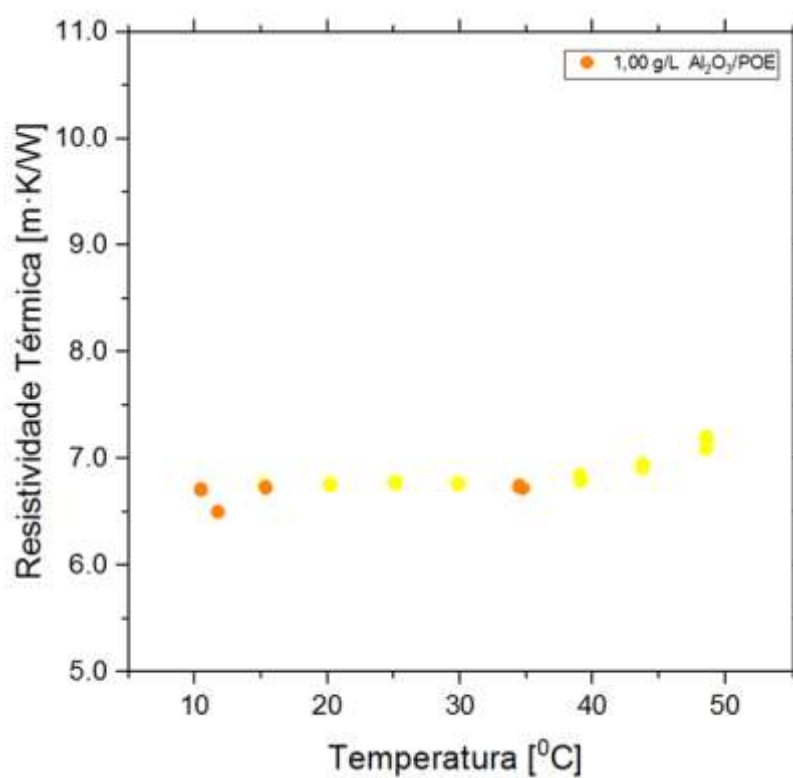


Figura C.5 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

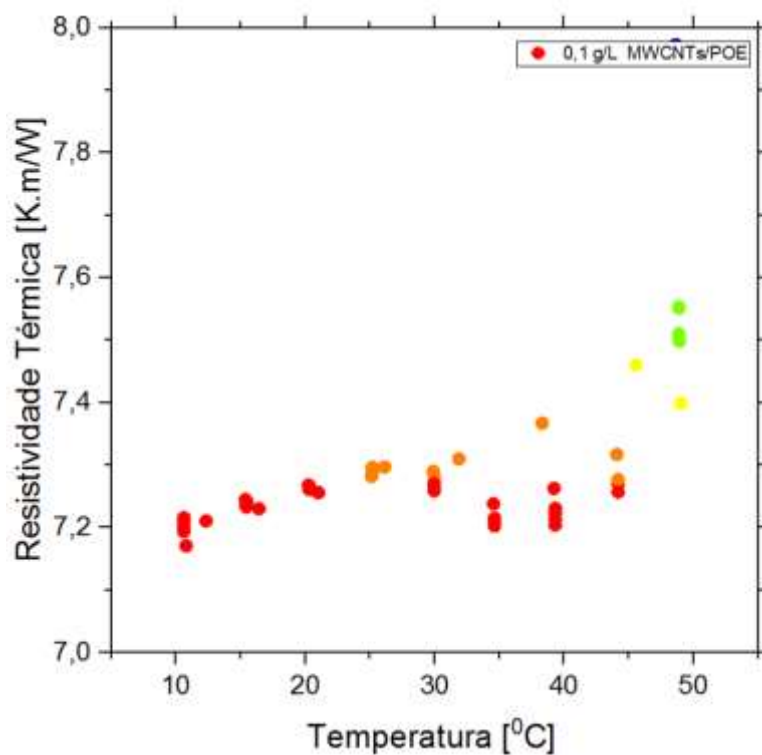


Figura C.6 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

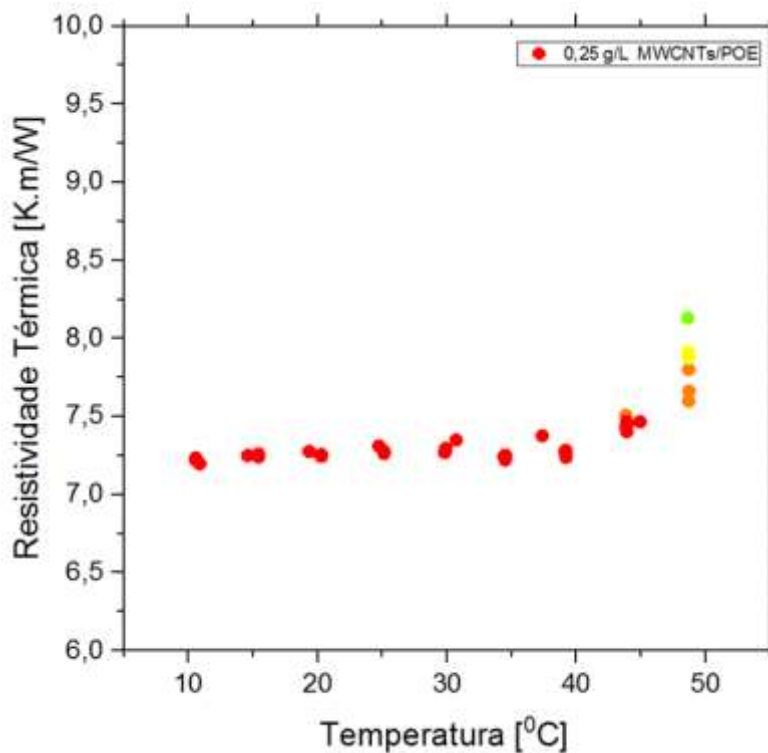


Figura C.7 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

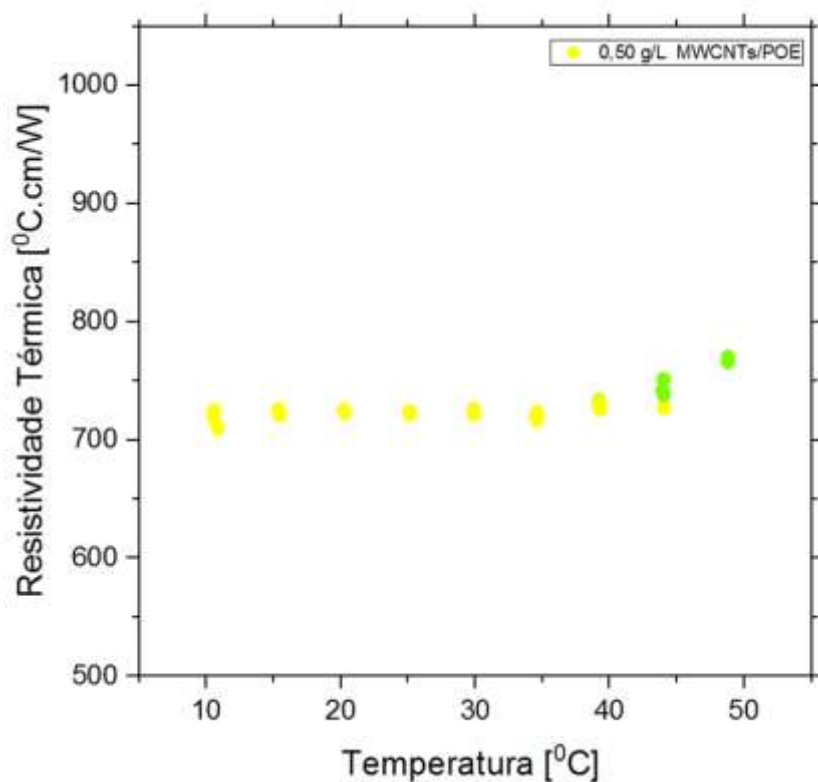


Figura C.8 – Resistividade térmica de nanofluido MWCNTs/POE na concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura

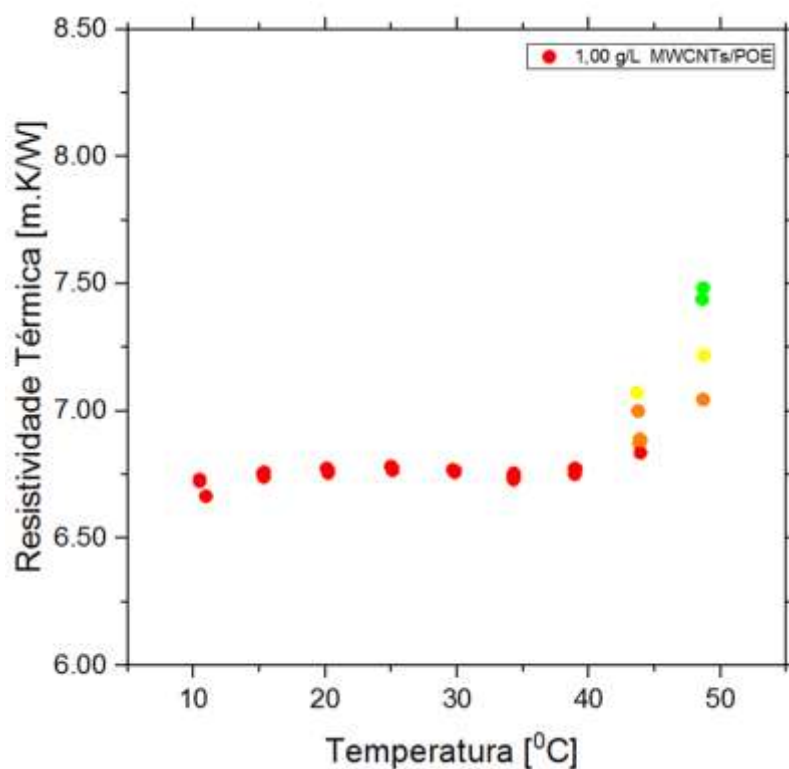


Figura C.9 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE na concentração de 0,10 g/L *versus* temperatura

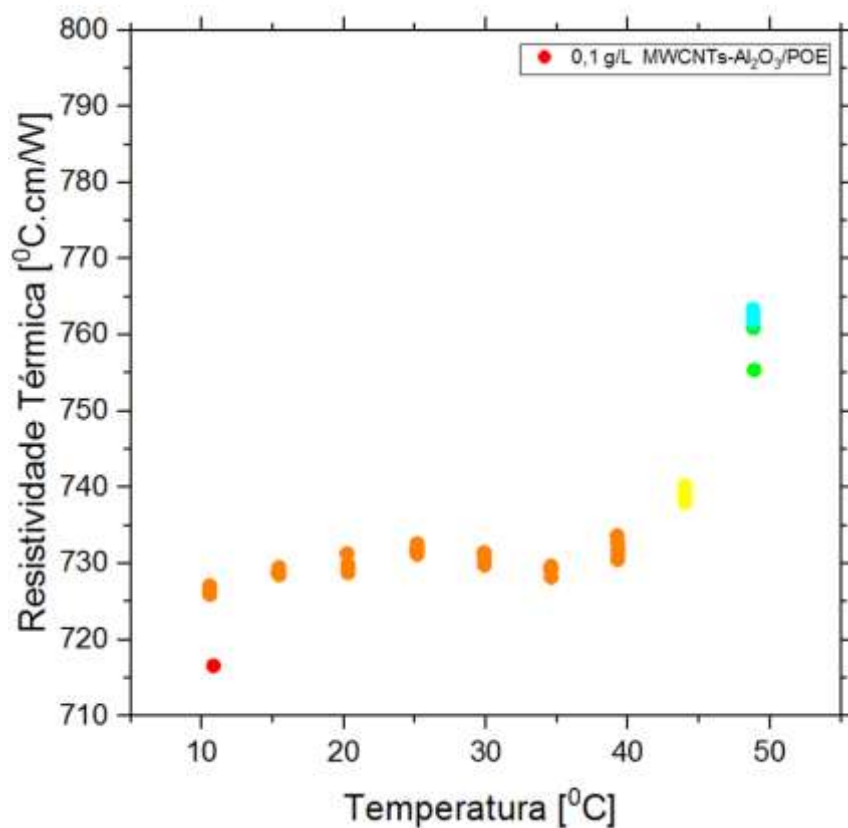


Figura C.10 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE na concentração de 0,25 g/L *versus* temperatura

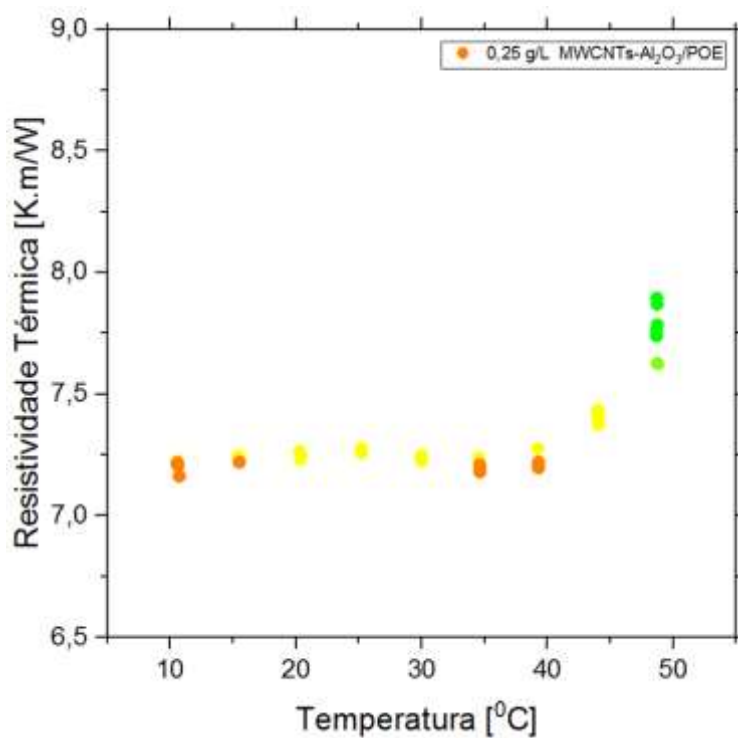


Figura C.11 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE na concentração de 0,50 g/L *versus* temperatura

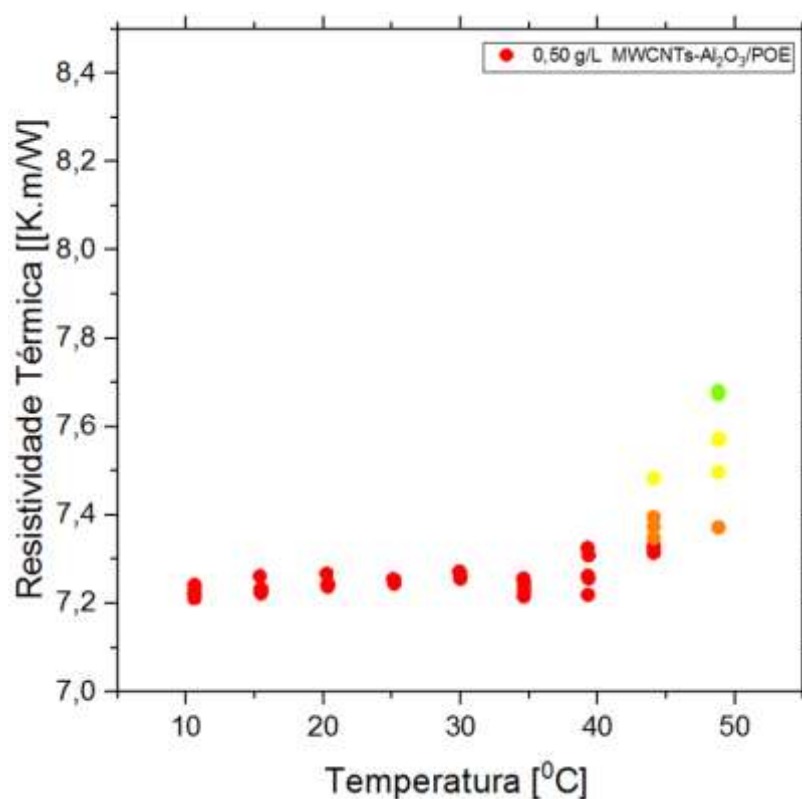
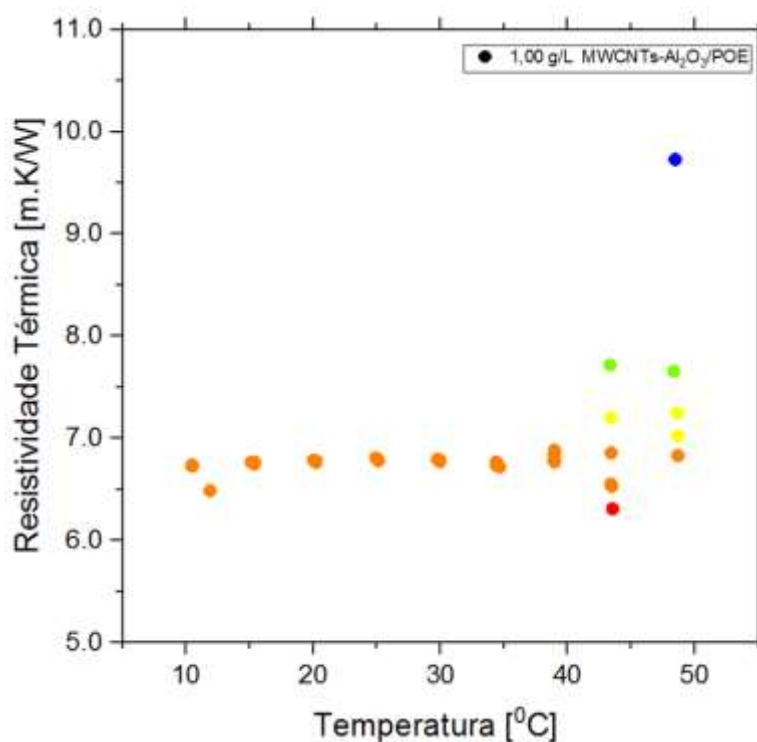


Figura C.12 – Resistividade térmica de nanofluido híbrido MWCNTs-Al₂O₃/POE na concentração de 1,00 g/L *versus* temperatura



Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior

 conhecimentolivre.org/home

 contato@conhecimentolivre.org

 [editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

ESTUDO EXPERIMENTAL DE NANOFLUIDO HÍBRIDO Al_2O_3 -MWCNTs/POE