

DANIEL ALBERTO FLÓREZ MORALES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRASFERÊNCIA DE
CALOR E QUEDA DE PRESSÃO DE NANOFUIDOS A
BASE DE ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR NO
INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2021

DANIEL ALBERTO FLÓREZ MORALES

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRASFERÊNCIA DE
CALOR E QUEDA DE PRESSÃO DE NANOFUIDOS A
BASE DE ÓLEO EM ESCOAMENTO LAMINAR NO
INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração:

Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA – MG

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M828 Morales, Daniel Alberto Florez, 1993-
2021 ESTUDO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E QUEDA
DE PRESSÃO DE NANOFUIDOS A BASE DE ÓLEO EM ESCOAMENTO
LAMINAR NO INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS [recurso
eletrônico] / Daniel Alberto Florez Morales. - 2021.

Orientador: ENIO PEDONE BANDARRA FILHO.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.12>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. BANDARRA FILHO, ENIO PEDONE
,1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 577, COPEM				
Data:	28/01/2021	Hora de início:	10:00	Hora de encerramento:	13:05
Matrícula do Discente:	11822EMC001				
Nome do Discente:	Daniel Alberto Florez Morales				
Título do Trabalho:	Estudo Experimental da Transferência de Calor e Queda de Pressão de Nanofluidos a Base de Óleo em Escoamento Laminar no Interior de Tubos Horizontais				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Daniel Dall'Onder dos Santos - FEMEC/UFU; Paulo Smith Schneider - UFRGS; e Enio Pedone Bandarra Filho - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Enio Pedone Bandarra Filho, Daniel Dall'Onder dos Santos e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, e o Prof. Paulo Smith Schneider desde a cidade de Porto Alegre/RS, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/01/2021, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Dall'Onder dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/01/2021, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Smith Schneider, Usuário Externo**, em 28/01/2021, às 13:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2517716** e o código CRC **D611DAA2**.

*Dedico este trabalho a minha
família por ser meu maior
exemplo de amor e minha
motivação.*

AGRADECIMENTOS

De maneira especial, quero agradecer a minha mãe e meu irmão, Claudia e Germán, que com seu amor e carinho, desde o primeiro dia da minha vida, me acompanham e apoiam de forma incondicional.

A meu primo, Alejandro, por me acompanhar e apoiar durante todo este tempo de crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos, Edwin, Frank e David que tiveram uma participação emocional e profissional em todo este processo vivido durante meu mestrado.

A meu amigo e colega de pesquisa, Abdul, por depositar a sua confiança em mim, me apoiar e ajudar com seu conhecimento e experiência em cada uma das etapas deste trabalho.

Ao professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela orientação, paciência, confiança e a oportunidade de me permitir desenvolver este trabalho.

Ao grupo do Laboratório de Energia, Sistemas térmicos e Nanotecnologia, LESTnano, pelo apoio, ajuda técnica, acadêmica e linguística.

A meus colegas de laboratório, Elena, Daniel, Carolina, Leticia, Italo, Pedro e Felipe que contribuíram em algumas das etapas do trabalho de pesquisa.

Ao técnico do laboratório, Renato, pela ajuda fornecida na montagem e modificações realizadas na bancada experimental e ao Jonas, que mesmo não sendo parte da equipe técnica do laboratório LESTnano, sempre esteve a disposição para colaborar.

Ao professor Oscar Saul Hernandez, por suas orientações e seus sábios conselhos de vida.

Aos Eng. Ezequiel Costa Malateaux da Silva, Eng. MSc. Newton Reis de Moura e o químico Pedro Ricchini Villalobos da Petrobras pelo fornecimento do óleo térmico utilizado neste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro fornecido por médio das bolsas de estudos.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio à pesquisa e ao financiamento na participação de congressos nacionais.

Flórez, D.A.M., **Estudo experimental da transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos a base de óleo em escoamento laminar no interior de tubos horizontais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Brasil. 2021.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo experimental da transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos a base de óleo, escoando no interior de tubos horizontais. As nanopartículas utilizadas foram nanotubos de carbono de paredes múltiplas. Tais nanofluidos foram produzidos empregando o método de dois passos em três diferentes concentrações (0,005, 0,010 e 0,015 wt.%). A estabilidade dos nanofluidos é analisada por meio de inspeção visual e espectroscopia UV-VIS. As propriedades termofísicas como condutividade térmica, viscosidade e massa específica foram medidas experimentalmente. A bancada experimental foi instrumentada e modificada para satisfazer as condições nominais de ensaio estabelecidas. O fluxo de calor uniforme aplicado na superfície do tubo foi de 8 kW/m^2 , a vazão mássica foi variada entre 7-17 g/s, a temperatura de entrada na seção de teste foi mantida constante em 55 °C, 60 °C e 65 °C. A partir de parâmetros calculados como taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor e potência de bombeamento foi realizada uma análise do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos para sua possível utilização como fluido de transferência de calor em aplicações de sistemas térmicos. Com base nos resultados experimentais foi possível concluir que a utilização de nanotubos de carbono dispersos em óleo mostrou um aumento no coeficiente de transferência de calor em comparação ao fluido base. Por outro lado, a queda de pressão dos nanofluidos apresentou incrementos em comparação com o fluido base.

Palavras chave: Desempenho termo-hidráulico, nanotubos de carbono, nanofluidos, coeficiente de transferência de calor, queda de pressão.

Flórez, D.A.M., **Experimental study on the heat transfer and pressure drop of oil –based nanofluids in laminar flow inside horizontal tubes**. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Brazil. 2021

ABSTRACT

The present work presents an experimental study of the heat transfer and pressure drop of oil based nanofluids, flowing inside horizontal tubes. The nanoparticles used were multi-walled carbon nanotubes. Such nanofluids were produced using the two step method in three different concentrations (0,005, 0,010 and 0,015 wt.%). The stability of nanofluids is analyzed through visual inspection and UV-VIS spectroscopy. Thermophysical properties such as thermal conductivity, viscosity and density were measured experimentally. The experimental bench was instrumented and modified to satisfy the established test conditions. The uniform heat flux applied to the tube surface was 8 kW/m^2 , the mass flow rate varied between 7-17 g/s, the inlet temperature in the test section was kept constant at 55 °C, 60 °C and 65 °C. Based on parameters calculated as heat transfer rate, heat transfer coefficient and pumping power, an analysis of the thermo-hydraulic performance of nanofluids was carried out for their possible use as heat transfer fluid in thermal system applications. Based on the experimental results it was possible to conclude that the use of carbon nanotubes dispersed in oil showed an increase in the heat transfer coefficient compared to the base fluid. On the other hand, the pressure drop of nanofluids increased in comparison to the base fluid.

Keywords: Thermo-hydraulic performance, carbon nanotubes, nanofluids, heat transfer coefficient, pressure drop

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Escala de comprimentos e alguns exemplos relacionados	33
Figura 2.2 - Representação de um nanotubo de carbono com parede simples (a) e de um nanotubo de carbono com paredes múltiplas (b).	34
Figura 2.3 - Condutividade térmica de materiais sólidos e líquidos	36
Figura 2.4 - Número de publicações que contêm o termo "nanofluid" no banco de dados do ScienceDirect a partir de 2001 e atualizado até ano 2019.....	37
Figura 2.5 - Variáveis de interesse na preparação de nanofluidos.....	39
Figura 2.6 - Diagrama esquemático da dispersão de nanofluidos mostrando vários tipos de forças exercidas em uma única nanopartícula e interação entre nanopartículas, nanorods e nanopartículas vizinhas, o que leva à agregação dentro do fluido base.....	43
Figura 2.7 - Esquema de mecanismos de estabilização para nanofluidos. (A) Estabilização eletrostática, (B) Estabilização estérica, (C) (D) Estabilização eletrostérica.....	45
Figura 2.8 - Esquema representativo da síntese de nanofluidos de diamante utilizando ácido oleico como agente estabilizante.....	49
Figura 2.9 - Microscopia (MET) para nanofluidos a base de óleo produzidos mediante o método de dois passos por: (a) agitação manual; (b) agitação mecânica; (c) banho ultrassônico; (d) Sonicador de alta frequência; (e) Homogeneizador de alta pressão.	50

Figura 2.10 - Representação esquemática do processo de preparação de nanofluidos pelo método de dois passos com sonda ultrassônica. A) Nanopartículas sintetizadas B) Adição de fluido base C) Ultrassonicação de partículas aglomeradas D) Nanofluido estável.....	51
Figura 2.11 - Diferentes cenários de nanofluidos estáveis e instáveis	53
Figura 2.12 - Esquema de espectrofotômetro UV-VIS	55
Figura 2.13 - Fatores que influenciam na condutividade térmica de nanofluidos	59
Figura 2.14 - Aumento na condutividade térmica de nanofluidos em função da concentração sólida de nanopartículas encontradas na literatura em estudos sobre nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo	61
Figura 2.15 - Técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos	65
Figura 2.16 - Fatores que influenciam na viscosidade de nanofluidos	67
Figura 3.1 - Processador ultrassônico Q500SONICA utilizado no processo de homogeneização dos nanofluidos; (a) Controlador e (b) sonda ultrassom	88
Figura 3.2 - Centrífuga UNIVERSAL 320R, utilizada no processo de preparação de nanofluidos de CNT+AO	88
Figura 3.3 - Processos de modificação superficial dos nanotubos de carbono; (a) dispersão em ácido oleico e (b) após o processo de centrifugação.....	89
Figura 3.4 - Fotos das amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo produzidos (a) nanopartículas sem tratamento superficial; (b) com tratamento superficial.	91

Figura 3.5 - Processo de produção de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo	92
Figura 3.6 - Viscosímetro Starbinger 3000 utilizado para as medições de massa específica e viscosidade de fluidos	93
Figura 3.7 - Esquema da célula de medição do viscosímetro SVM3000.....	94
Figura 3.8 - Condutivímetro Linseis e vistas aproximadas do sensor THB	96
Figura 3.9 - Esquema dos componentes do processo de medição de condutividade térmica de nanofluidos	97
Figura 3.10 - Espectrofotômetro UV-1900 do laboratório LESTnano	99
Figura 3.11 - Diagrama esquemático da bancada experimental	100
Figura 3.12 - Representação esquematizada na instalação dos instrumentos de medição de temperatura. (a) posição dos sensores de temperatura na parede do tubo; (b) vista frontal e lateral de um segmento da seção de teste.....	102
Figura 3.13 - Modelagem 3D do trocador de calor projetado e construído.....	104
Figura 3.14 - (a) Bomba de engrenagens; (b) Válvula eliminadora de ar; (c) Medidor de vazão de Coriolis.....	105
Figura 3.15 - Interface gráfica em LabView.....	106
Figura 3.16 - Chassi nicdaq-9178 CompactDAQ USB utilizado no sistema de aquisição de dados	106
Figura 3.17 - Equipamento experimental final	108

Figura 3.18 - Resultados experimentais para comparação da potência elétrica “ $QP.E$ ” e a potência calculada pelo balanço de energia “ $QB.E$ ”.....	111
Figura 3.19 - Diagramas esquematizados. (a) Resistências térmicas na seção de testes; (b) Volume de controle em torno da temperatura média do fluido.	112
Figura 3.20 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de Sieder e Tate (1936).....	114
Figura 3.21 - Comparação entre o fator de atrito experimental e teórico em função do número de Reynolds (Óleo base).....	116
Figura 3.22 - Comparação entre o fator de atrito experimental e o teórico em função do número de Reynolds (Etilenoglicol)	117
Figura 4.1 - Fotos das amostras de nanofluidos CNT; (a) no primeiro dia da preparação; (b) após 1 mês da preparação; (c) após 2 meses da preparação	122
Figura 4.2 - Fotos das amostras de nanofluidos CNT+AO (a) no primeiro dia da preparação; (b) após 1 mês da preparação; (c) após 2 meses da preparação; (d) após 3 meses da preparação.....	123
Figura 4.3 - Relação linear entre a absorbância e a concentração de nanotubos de carbono de paredes múltiplas suspensas no óleo em um comprimento de onda de 497 nm.	124
Figura 4.4 - Espectro UV-VIS de nanotubos de carbono (MWCNT) sem tratamento superficial suspensos em óleo em diferentes dias. A) CNT_1; B) CNT_2; C) CNT_3.....	125
Figura 4.5 - Espectro UV-VIS de CNT+AO suspensos em óleo. a) CNT+AO_1; b) CNT+AO_2; c) CNT+AO_3.....	126

Figura 4.6 - Concentração relativa de nanopartículas dos nanofluidos em função do tempo de sedimentação.	127
Figura 4.7 - Comparação e validação dos valores experimentais da massa específica obtidos para água destilada.....	128
Figura 4.8 - Massa específica em função da temperatura (CNT)	129
Figura 4.9 - Massa relativa em função da temperatura (CNT)	130
Figura 4.10 - Massa específica dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo com tratamento superficial de nanopartículas (CNT+AO).....	131
Figura 4.11 - Massa específica relativa dos nanofluidos CNT+AO	131
Figura 4.12 - Comparação da massa específica experimental de nanofluidos deste trabalho em função da concentração volumétrica de nanopartículas (MWCNT) 50 °C e dados estimados pelo modelo de Pak e Cho (1998).....	132
Figura 4.13 - Calor específico dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo	133
Figura 4.14 - Condutividade térmica em função da temperatura dos nanofluidos CNT	135
Figura 4.15 - Condutividade térmica de nanofluidos CNT em função da temperatura	136
Figura 4.16 - Condutividade térmica de nanofluidos CNT+AO em função da variação de temperatura	137

Figura 4.17 - Condutividade térmica relativa dos nanofluidos CNT+AO em função da temperatura	137
Figura 4.18 - Viscosidade dinâmica de nanofluidos CNT em função da temperatura	139
Figura 4.19 - Viscosidade relativa dos nanofluidos CNT em função da temperatura	139
Figura 4.20 - Nanofluidos produzidos, aumentando a concentração de esquerda para direita dias após a sua preparação.....	140
Figura 4.21 - Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos CNT+AO em função da temperatura.....	141
Figura 4.22 - Valores de viscosidade relativa teórica e experimental dos nanofluidos em função da concentração volumétrica de partículas à temperatura de 60 °C	142
Figura 4.23 - Resultados experimentais do coeficiente médio transferência de calor amostras de nanofluidos CNT em função do número de Reynolds e Velocidade mássica.	145
Figura 4.24 - Coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds dos nanofluidos de CNT a base de óleo.....	146
Figura 4.25 - Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos CNT+AO.....	148
Figura 4.26 - Variação do coeficiente médio de transferência de calor com o número de Reynolds para o óleo base e nanofluidos CNT+AO	149

Figura 4.27 - Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial para cada número de Reynolds.....	150
Figura 4.28 - Nusselt local teórico e experimental ao longo da seção de teste, para um $Re=70\pm 10$ (a), e $Re=130\pm 10$ (b).....	151
Figura 4.29 - Número de Nusselt dos nanofluidos CNT (a) e CNT+AO (b), ao longo da seção de teste, para um $Re=70\pm 10$	152
Figura 4.30 - Variação do aumento do número de Nusselt do fluido base e nanofluidos de (a)CNT e (b)CNT+AO ao longo da posição axial para um $Re=70\pm 10$...	154
Figura 4.31 - Número de Nusselt do fluido base e nanofluidos CNT(a) e (b) ao longo da seção de teste, para $Re=130\pm 10$	155
Figura 4.32 - Variação do aumento do número de Nusselt ao longo da seção de teste, para um $Re=130\pm 10$	156
Figura 4.33 - Queda de pressão e fator de atrito das amostras de CNT. (a) f vs Re ; (b) ΔP vs G	158
Figura 4.34 - Fator de atrito e queda de pressão dos nanofluidos de CNT+AO. (a) f vs Re ; (b) ΔP vs G	159
Figura 4.35 - Desempenho termo-hidráulico de nanofluidos CNT	161
Figura 4.36 - Desempenho termohidráulico de nanofluidos CNT+AO	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo de estudos sobre condutividade térmica de nanofluidos a base de óleo encontrados na literatura.....	63
Tabela 2.2 - Resumo de correlações empíricas propostas para estimar a condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT a base de óleo.	64
Tabela 2.3 - Resumo de modelos clássicos para prever a viscosidade de diferentes suspensões	70
Tabela 2.4 - Resumo de correlações propostas para estimar a viscosidade dinâmica de nanofluidos a base de óleo.....	71
Tabela 2.5 - Trabalhos experimentais sobre a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar - água e/ou etilenoglicol	79
Tabela 2.6 - Trabalhos experimentais sobre transferência de calor de nanofluidos a base de óleo	81
Tabela 3.1 - Descrição das amostras de nanofluidos produzidos a base de óleo.....	90
Tabela 3.2 - Incerteza de medição das medições no equipamento SVM3000	95
Tabela 3.3 - Módulos e instrumentos que compõem o sistema de monitoramento .	107
Tabela 3.4 - Condições de teste - Validação bancada experimental	109
Tabela 3.5 - Incertezas de medição dos parâmetros primários ou variáveis medidas pelos instrumentos	118

Tabela 3.6 - Incertezas de medição dos parâmetros secundários ou variáveis calculadas dependentes das medições.....	119
Tabela 4.1 - Parâmetros operacionais.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

A_s	-área superficial [m^2]
C_p	-calor específico a calor a pressão constante [kJ/kgK]
d_p	-diâmetro medido da nanopartícula [nm]
D	-diâmetro de tubo interno [m]
e	-espessura [mm]
G	-velocidade mássica [kg/sm^2]
f	-fator de atrito [-]
h	-coeficiente de transferência de calor [W/m^2K]
I	-corrente [A]
k	-condutividade térmica [W/mK]
k_a	-Calor [kJ/kgK]
k_B	-constante de Boltzman [J/K]
l	-comprimento de nano partícula [μm]
ln	-logaritmo natural
L	-comprimento de tubo [m]
\dot{m}	-vazão mássica [kg]
pH	- potencial hidrogeniônico
q''	-calor por unidade de área [w/m^2]
\dot{Q}	-taxa de transferência de calor [W]
r	-razão de aspecto [-]

R	-resistência térmica [m^2K/W]
t	-tempo [s]
T	-temperatura [$^{\circ}C$]
V	-volume [m^3]
V	-voltagem [V]
vc	-volume de controle
x	-distancia axial [m]
\dot{W}	-potência de bombeamento [W]
wt	-concentração mássica

Letras Gregas

α	-difusividade térmica [m^2/s]
ΔP	-queda de pressão [Pa]
ΔT	-diferença de temperatura [$^{\circ}C$]
τD	-escala de tempo para uma partícula deslocar seu comprimento [s]
μ	-viscosidade dinâmica [kg/ms]
ϕ	-concentração volumétrica
π	-razão ente o perímetro e o diâmetro de uma circunferência
ρ	-massa específica [kg/m^3]

Números adimensionais

<i>Nu</i>	-número de Nusselt
<i>Pr</i>	-número de Prandtl
<i>Re</i>	-número de Reynold

Abreviações

<i>LEST-nano</i>	-Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
<i>OT</i>	-Óleo térmico
<i>PVD</i>	-Disposição física de vapor
<i>SWCNT</i>	-Nanotubo de carbono de parede simples
<i>UFU</i>	-Universidade Federal de Uberlândia
<i>MWCNT</i>	-Nanotubo de carbono de parede múltipla
<i>HTF</i>	-Heat transfer Fluid

Subscritos

<i>BE</i>	-balanço de energia
<i>M</i>	-médio
<i>nf</i>	-nanofluido
<i>np</i>	-nanopartícula
<i>ent</i>	-entrada

<i>exp</i>	-experimental
<i>max</i>	-máximo
<i>p</i>	-parede
<i>PE</i>	-potência elétrica
<i>r</i>	-razão entre propriedades do fluido e do fluido base
<i>sai</i>	-saída
<i>sol</i>	-solução
<i>x</i>	-posição local
<i>g</i>	- gravidade[m/s ²]

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	26
1.1 Considerações Iniciais.....	26
1.2 Motivação	26
1.3 Objetivos.....	28
1.3.1 Objetivo geral.....	28
1.3.2 Objetivos específicos	28
1.4 Organização do trabalho.....	29
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1 Considerações Iniciais.....	32
2.2 Nanotubos de Carbono	32
2.2.1 Estrutura e síntese.....	33
2.2.2 Síntese de nanotubos de carbono.....	34
2.3 Nanofluidos.....	35
2.3.1 Contexto histórico.....	35
2.3.2 O interesse para a comunidade científica.....	36
2.3.3 Características gerais dos nanofluidos.....	38
2.4 Preparação de Nanofluidos	38
2.4.1 Modelos clássicos para calcular a concentração de nanopartículas.....	40
2.4.2 Métodos de preparação	40
2.5 Estabilidade de nanofluidos	42
2.5.1 Introdução e conceitos básicos de estabilidade de nanofluidos	42
2.5.2 Mecanismos de estabilização	44
2.5.3 Técnicas para melhorar a estabilidade de nanofluidos	46

2.5.4 Tratamento físico ou mecânico – Sonicação por alta frequência...	50
2.5.5 Métodos de análise de estabilidade de nanofluidos.....	52
2.6 Propriedades termofísicas de nanofluidos	57
2.6.1 Condutividade térmica de nanofluidos	57
2.6.2 Viscosidade de nanofluidos.....	66
2.6.3 Calor específico	72
2.6.4 Massa específica.....	73
2.7 Transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos.....	74
2.8 Queda de pressão e fator de atrito em escoamento interno de nanofluidos	83
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	86
3.1 Considerações iniciais	86
3.2 Síntese dos nanofluidos	86
3.2.1 Materiais.....	87
3.2.2 Equipamentos utilizados na preparação de nanofluido.....	87
3.2.3 Tratamento superficial de nanopartículas	89
3.2.4 Preparação dos nanofluidos (MWCNT)	90
3.3 Caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos.....	93
3.3.1 Massa específica e viscosidade	93
3.3.2 Calor específico	95
3.3.3 Condutividade térmica.....	95
3.4 Análise de estabilidade dos nanofluidos	97
3.5 Bancada experimental	99
3.5.1 Seção de testes.....	100
3.5.2 Sistema de pré-aquecimento	102

3.5.3 Sistema de resfriamento.....	103
3.5.4 Sistema de escoamento e medição de vazão mássica.....	104
3.5.5 Sistema de monitoramento e aquisição de dados	105
3.6 Análise e validação da bancada experimental	108
3.6.1 Balanço de energia e isolamento da seção de testes.....	110
3.6.2 Coeficiente de transferência de calor.....	111
3.6.3 Queda de pressão e fator de atrito	115
3.7 Análise de incertezas.....	117
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	121
4.1 Estabilidade de nanofluidos	121
4.1.1 Análise de inspeção visual	121
4.1.2 Análise espectroscopia UV-VIS.....	123
4.2 Propriedades termofísicas	128
4.2.1 Massa específica.....	128
4.2.2 Calor específico	133
4.2.3 Condutividade térmica.....	134
4.2.4 Viscosidade	138
4.3 Transferência de calor por convecção forçada interna dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo.....	143
4.3.1 Coeficiente médio de transferência de calor por convecção.....	144
4.3.2Análise local do coeficiente de transferência de calor ao longo da seção de teste	149
4.4 Queda de pressão e fator de atrito dos nanofluidos	157
4.4.1 Nanofluidos CNT	157
4.4.2 Nanofluidos CNT+AO.....	159

4.5 Desempenho termo-hidraulico dos nanofluidos	160
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	164
5.1 Conclusões.....	164
5.2 Sugestões	166
5.3 Considerações finais.....	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

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 a apresentação da estrutura organizacional do documento, com intuito de estimular e facilitar a compreensão da dissertação.

1.2 Motivação

Fluidos convencionais, como água, etilenoglicol e óleo, são frequentemente usados como fluidos de transferência de calor (HTF) em equipamentos de sistemas térmicos. Exemplos de usos importantes de HTF incluem sistemas de refrigeração veicular e aviação na indústria de transporte, sistemas de calefação e refrigeração em residências, sistemas de aquecimento e resfriamento dos processos na indústria petroquímica, química, têxtil, alimentos e usinas termoelétricas de geração de energia, entre outras. No entanto, as pobres propriedades de transferência de calor desses fluidos comuns em comparação com a maioria dos sólidos limitam à alta compactação e eficácia dos trocadores de calor (CHOI E EASTMAN,1995).

O advento da nanotecnologia possibilitou a sintetização de partículas sólidas de escala nanométrica. Surgiu assim uma aplicação potencial e imediata, por meio da qual originou-se uma nova classe de fluidos, denominados como “NANOFLUIDOS”, propostos e definidos por Choi e Eastman (1995) como uma dispersão de materiais sólidos em escala nanométrica (1-100 nm) em um líquido comumente denominado como fluido base. Verificou-se que os nanofluidos possuem propriedades termofísicas aprimoradas quando comparados com os fluidos base, demonstrando um grande potencial de aplicação em muitos campos (CHITRA E SENDHILNATHAN, 2013).

Nesse sentido, após Choi e Eastman (1995) ter proposto os nanofluidos como uma nova geração de fluidos que superassem os desafios nos sistemas térmicos, muitas pesquisas, tanto experimentais como teóricas têm-se dedicado ao estudo de diversos parâmetros que influenciam a transferência de calor com nanofluidos. Na primeira década após a descoberta dos nanofluidos (1995-2005), vários artigos publicados

focaram na caracterização de propriedades termofísicas. Na segunda década (2005-2015), o número de publicações sobre nanofluidos cresceu consideravelmente para explorar técnicas de preparação, caracterização, modelagem, avaliação teórica e experimental da transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos. Nos últimos cinco anos os estudos sobre nanofluidos na literatura têm se interessado notavelmente pela avaliação da estabilidade empregando distintos métodos qualitativos e quantitativos.

A estabilidade é um requisito essencial para a aplicação de nanofluidos em sistemas térmicos. Os nanomateriais em suspensão dessa classe de fluidos, tendem a se aglomerar (até o tamanho de microns), o que pode resultar em sedimentação, em entupimento subsequentes dos canais do trocador de calor, em redução na condutividade térmica do nanofluido, e conseqüentemente a transferência de calor dos nanofluidos (SEZER et al., 2019a). Hoje em dia, a estabilidade da dispersão, continua sendo considerada como uma das questões mais desafiadoras que limitam o uso prático e o desenvolvimento de nanofluidos.

Por outro lado, apesar do número crescente de publicações a respeito das características termo-hidráulicas de nanofluidos, a real aplicação desta nova classe de fluido de trabalho em sistemas térmicos requer grandes esforços de pesquisa. Mesmo que estudos recentes tenham empregado ferramental tecnologicamente mais adequado, alguns resultados ainda são inconsistentes e, como regra geral, restringem-se a correlacionar resultados experimentais específicos. Assim, os nanofluidos constituem uma oportunidade para pesquisa em diferentes áreas e sob as mais variadas abordagens (HOFFMAN, 2014).

Baseando-se nos argumentos mencionados, o presente trabalho pretende avaliar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos a base de óleo, com o intuito de obter resultados experimentais que permitam gerar informações quantitativas sobre a utilização desses tipos de partículas em óleo, a fim de determinar sua possível aplicabilidade em processos de sistemas térmicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho centrou-se na avaliação experimental da transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos a base de óleo térmico escoando em regime laminar dentro de um tubo horizontal, visando possíveis aplicações desse tipo de fluido que possibilitem o aumento do desempenho de sistemas térmicos. Os dados experimentais servirão de apoio para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos na utilização de nanopartículas como aditivo em óleo térmico para sistemas de transferência de calor.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre nanofluidos, tendo foco especial nas áreas que competem com os estudos sobre propriedades termofísicas e transferência de calor de nanofluidos;
- Sínteses de nanofluidos;
- Avaliar estabilidade dos nanofluidos produzidos;
- Caracterizar as propriedades termofísicas dos nanofluidos (condutividade térmica, viscosidade e massa específica);
- Avaliar experimentalmente a transferência de calor e queda de pressão dos nanofluidos;
- Comparar os resultados obtidos de transferência de calor e queda de pressão para as amostras de nanofluidos em relação ao fluido base.

1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho procurou realizar um estudo experimental da transferência de calor e queda de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo. Nesse sentido, este trabalho foi organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: aborda-se as características dos nanotubos de carbono, mostrando suas estruturas e apresentando seus principais processos de síntese. Posteriormente, é apresentado o estado da arte dos nanofluidos, começando com uma contextualização histórica e o interesse da pesquisa de nanofluidos para a comunidade científica é explicada. Na sequência, são tratados os principais métodos de preparação de nanofluidos. Em seguida, é apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre estabilidade de nanofluidos. Na seção seguinte, são apresentadas as pesquisas experimentais e teóricas sobre caracterização de propriedades termofísicas. Finalmente, a última seção é dedicada às pesquisas sobre transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos.

Capítulo 3: inicialmente, são apresentados os materiais e procedimentos utilizados para a preparação dos nanofluidos deste trabalho. Posteriormente, são apresentados os métodos e equipamentos utilizados para a avaliação experimental de propriedades termofísicas e estabilidade dos nanofluidos produzidos. Após disso, é apresentada a bancada experimental para a determinação do coeficiente de transferência de calor e queda de pressão dos nanofluidos produzidos e descreve as considerações teóricas adotadas que fundamentam a realização dos experimentos. Finalmente, é apresentada uma análise de validação de resultados dos testes realizados com o intuito de verificar o comportamento da bancada e bom funcionamento dos seus sistemas.

Capítulo 4: Esse capítulo refere-se aos resultados obtidos experimentalmente para os nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo produzidos neste trabalho. Primeiramente, são apresentados os resultados relacionados à estabilidade dos nanofluidos. Em seguida, são apresentados os resultados alusivos às medições experimentais das propriedades termofísicas dos nanofluidos como condutividade térmica, viscosidade dinâmica, massa específica. Também podem ser encontrados os resultados do calor específico dos nanofluidos produzidos, que foram obtidos por intermédio do modelo analítico comumente utilizado. A parte final do capítulo é dedicada à análise de transferência de calor e queda de pressão dos nanofluidos. Essa

análise compreende uma comparação entre os resultados obtidos para os nanofluidos, com os obtidos para o fluido base, a fim de identificar se houve ou não intensificação em parâmetros como o coeficiente de transferência de calor e queda de pressão.

Capítulo 5: apresenta-se as principais conclusões do trabalho e recomendações para próximos passos em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo contempla a pesquisa bibliográfica realizada ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, e apresenta os tópicos necessários para facilitar a compressão do texto ao leitor. Por tanto, foram abordados os aspectos teóricos, conceituais e metodológicos necessários para atingir os objetivos propostos. Inicialmente, aspectos gerais da nanociência e nanotecnologia são apresentados. Em seguida, uma abordagem referente aos nanotubos de carbono é exposta. Na sequência, uma ampla seção é dedicada aos nanofluidos. Esta seção contém uma contextualização histórica, características gerais, principais desafios a serem superados e aplicações. A referida seção também aborda os métodos de síntese, caracterização das propriedades termofísicas, avaliação da estabilidade e homogeneidade das dispersões. Finalmente, a quinta seção do capítulo, é dedicada a ao estado da arte dos trabalhos relacionados ao desempenho da transferência de calor e queda de pressão em escoamento monofásico de nanofluidos a base de óleo em regime laminar.

2.2 Nanotubos de Carbono

Entre os materiais criados pelo homem e utilizados na nanotecnologia estão os nanotubos de carbono (CNT). Em 1991, Sumio Iijima demonstrou a existência de novas estruturas moleculares que são definidas como formas metaestáveis de carbono resultantes do enrolamento de um plano de átomos de carbono sob a forma de um cilindro com diâmetro da ordem de nanômetros. Esses materiais têm apresentado excelentes propriedades mecânicas, assim como altas condutividades elétricas e térmicas. Consequentemente, o número de potenciais aplicações comerciais dos CNT é enorme, proporcionando um aumento em suas taxas de produção anual.

A nanociência e as nanotecnologias contemplam o mundo nanométrico, no qual a dimensão física é representada por uma unidade equivalente ao bilionésimo do metro

($1 \times 10^9 \text{ m} = 1 \text{ nm}$). Serrano et al., (2009) forneceram exemplos de nanômetros em comparação com milímetros e micrômetros, como pode ser visto na Fig. 2.1.

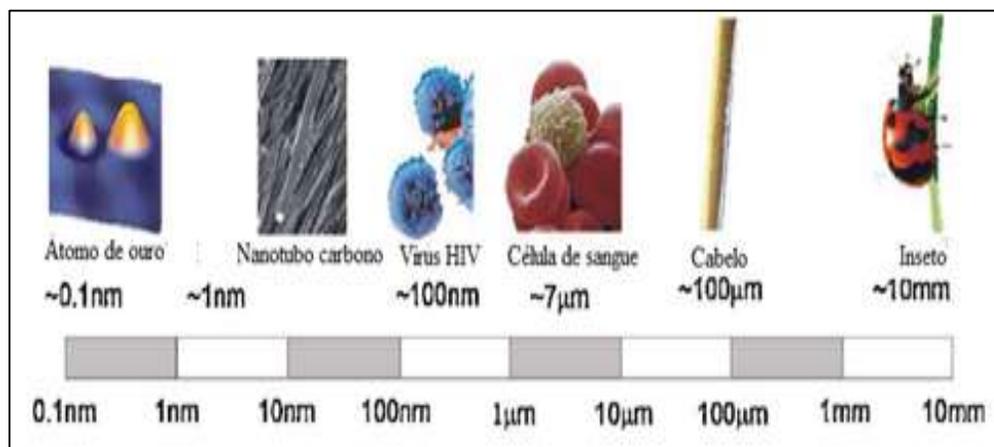


Figura 2.1 - Escala de comprimentos e alguns exemplos relacionados

Fonte: Adaptada de Serrano et al., 2009

2.2.1 Estrutura e síntese

A diversidade das aplicações, reais ou potenciais, dos nanotubos de carbono, assim como a necessidade de controlar as morfologias apropriadas para sua utilização, fazem da pesquisa nesta área do conhecimento, um trabalho de característica eminentemente multidisciplinar, envolvendo fatores que definem o sucesso de suas aplicações, tais como rota de síntese, processamento em formas variadas e qualidade dos CNT (HERBST et al., 2004).

Os CNT podem ser divididos em duas categorias: nanotubos com parede única ou simples (SWCNT), que são formados pelo enrolamento de uma camada de grafeno, e nanotubos com paredes múltiplas (MWCNT), que são formados por múltiplas camadas de grafeno enroladas em forma cilíndrica. O espaçamento entre as camadas é levemente superior à distância interplanar do grafite. Os cilindros de carbono podem ser encontrados com pontas fechadas ou abertas (DA CRUZ SANTOS, 2011).

Para um maior entendimento das diferentes nanoestruturas dos nanotubos de carbono, na Fig. 2.2 são apresentados esquematicamente os dois tipos de nanotubos de carbono.

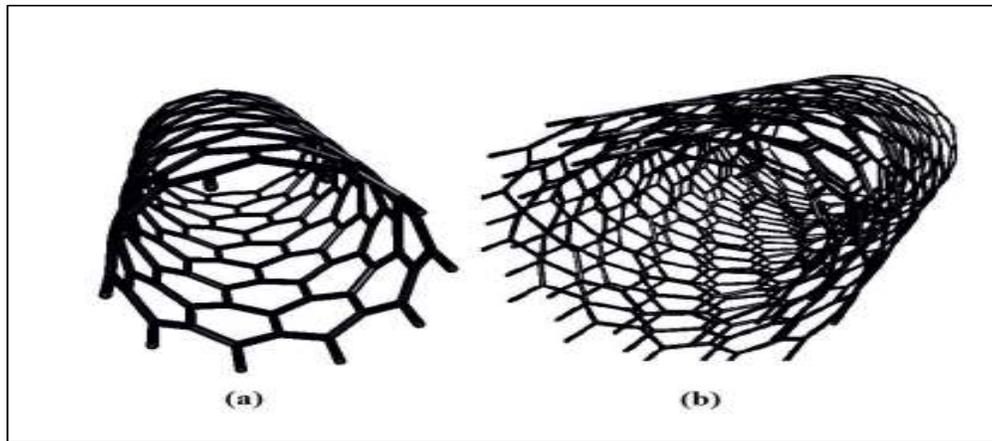


Figura 2.2 - Representação de um nanotubo de carbono com parede simples (a) e de um nanotubo de carbono com paredes múltiplas (b).

Fonte: Da Cruz Santos, 2011

2.2.2 Síntese de nanotubos de carbono

Entre os principais métodos de síntese de nanotubos de carbono estão:

- I) Descarga de Arco: nesse processo são produzidas descargas elétricas entre dois eletrodos de grafite dopados com catalisadores metálicos (Fe, Ni, Co, Mo, etc.) sob atmosfera inerte de hélio ou argônio. As correntes de alta intensidade aquecem os eletrodos a temperaturas superiores a 3000°C vaporizando o grafite, que se condensa sob a forma de uma fuligem que contém os nanotubos de carbono, fullerenos e carbono amorfo.
- II) Ablação por laser: nessa técnica um laser é utilizado para vaporizar um alvo de grafite dentro de um forno a 1200°C na presença de um fluxo de gás inerte. A vaporização produz espécies de carbono que são arrastadas pelo gás inerte da zona de alta temperatura e depositadas em um coletor cônico de cobre resfriado por água.
- III) Deposição Química de Vapor: consiste na decomposição térmica ou pirólise de hidrocarbonetos leves (metano, acetileno, etileno) como precursores de carbono utilizando um catalisador metálico (Fe, Ni, Co, Mo, etc.) sob pressão atmosférica. Esse método é mais viável do que os demais, pois as temperaturas utilizadas são inferiores (entre 600 e 1000°C), de modo que a pureza do produto final é maior, permitindo a produção de nanotubos em larga escala.

2.3 Nanofluidos

2.3.1 Contexto histórico

Fluidos convencionais, como água, etilenoglicol, e óleo térmico, são frequentemente usados como fluidos de transferência de calor (HTF) em equipamentos de sistemas térmicos. Exemplos de usos importantes de HTF incluem sistemas de refrigeração veicular e aviônica na indústria de transporte, sistemas de calefação e refrigeração em residências, sistemas de aquecimento e resfriamento dos processos na indústria petroquímica, química, têxtil, alimentos e usinas termoelétricas de geração de energia, entre outros. Em todas estas aplicações, as propriedades térmicas e reológicas dos fluidos convencionais têm um papel fundamental no desenvolvimento de equipamentos de transferência de calor com eficiência energética (CHOI; EASTMAN, 1995c).

No entanto, os fluidos convencionais possuem uma condutividade térmica reduzida quando comparados com materiais sólidos, o que limita o desenvolvimento de equipamentos energeticamente mais eficientes. Os valores da condutividade térmica de materiais sólidos e líquidos conhecidos estão apresentados na Fig. 2.3.

Visando o aprimoramento na eficiência dos sistemas térmicos, Maxwell (1873) propôs utilizar partículas metálicas para melhorar a condutividade térmica dos fluidos mediante a dispersão de partículas sólidas com tamanhos micrométricos, geralmente tendo um tamanho entre 0,1 e 100 μm em líquidos. No entanto, eles apresentaram as seguintes desvantagens:

- I) As partículas assentam rapidamente, formando uma camada na superfície e reduzindo a capacidade de transferência de calor do fluido.
- II) Se a taxa de circulação do fluido é aumentada, a sedimentação é reduzida, mas a erosão dos dispositivos de transferência de calor, tubulações, etc., aumenta rapidamente.
- III) O grande tamanho das partículas tende a entupir os canais de fluxo, particularmente se os canais de arrefecimento forem estreitos.
- IV) A queda de pressão no fluido aumenta consideravelmente.

- V) O aprimoramento de condutividade baseado na concentração de partículas é alcançado (isto é, quanto maior a fração de volume de partículas, maior o aprimoramento - e maiores os problemas, como indicado em 1-4 acima).

O advento da nanotecnologia possibilitou a sintetização de partículas sólidas de escala nanométrica, surgiu uma aplicação potencial e imediata, originou-se uma nova classe de fluidos, denominados “NANOFLUIDOS”, propostos e definidos por Choi e Eastman (1995) como uma dispersão de materiais sólidos em escala nanométrica (1-100 nm) em um líquido comumente denominado como fluido base. Verificou-se que os nanofluidos possuem propriedades termofísicas aprimoradas quando comparados com os fluidos base, demonstrando grandes potenciais de aplicação em muitos campos (CHITRA; SENDHILNATHAN, 2013).

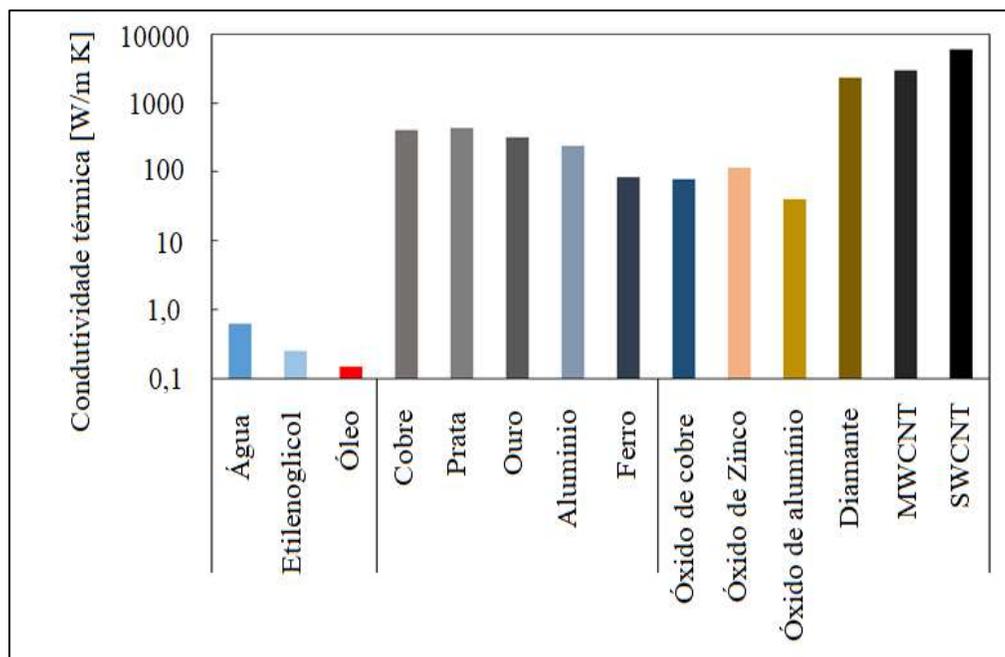


Figura 2.3 - Condutividade térmica de materiais sólidos e líquidos

Legenda: MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas, SWCNT: Nanotubos de carbono de paredes simples.

Fonte: Adaptado de Li et al., (2009)

2.3.2 O interesse para a comunidade científica

Os nanofluidos surgiram como uma nova alternativa de fluidos de transferência de calor para o aprimoramento da eficiência nos sistemas térmicos. Estes tipos de

fluidos têm atraído grande interesse da comunidade científica, principalmente pela potencialização de suas propriedades termofísicas. Após Choi e Eastman (1995), ter proposto os nanofluidos como uma nova geração de fluidos que superassem os desafios de desenvolver sistemas de troca térmica energeticamente eficientes, muitas pesquisas, tanto experimentais como teóricas têm-se dedicado ao estudo de diversos parâmetros que influenciam a transferência de calor com nanofluidos como pode ser visto na fig. 2.4, onde pode ser visto o número de artigos publicados sobre nanofluidos desde o ano 2001, com o primeiro trabalho que envolve óleo como fluido base segundo dados publicados no portal ScienceDirect até o ano 2019.

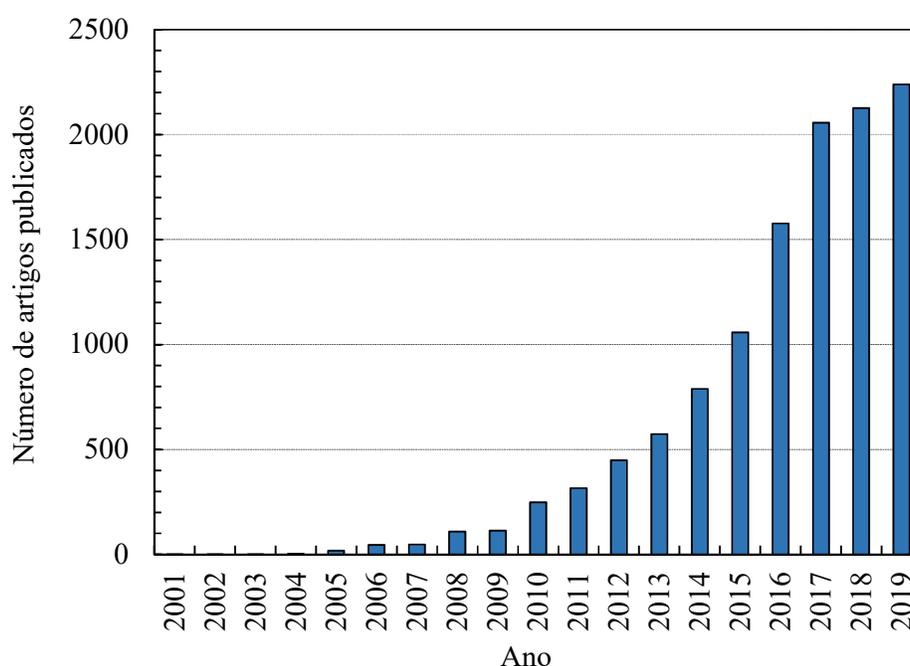


Figura 2.4 - Número de publicações que contêm o termo "nanofluid" no banco de dados do ScienceDirect a partir de 2001 e atualizado até ano 2019

Fonte: ScienceDirect.com

A invenção dos nanofluidos apresentou novos desafios e oportunidades para os cientistas térmicos e engenheiros. No entanto, apesar do número crescente de publicações a respeito das características termo-hidráulicas de nanofluidos, a real aplicação desta nova classe de fluido de trabalho requer grandes esforços de pesquisa. Mesmo que estudos recentes tenham empregado ferramental tecnologicamente mais adequado, alguns resultados ainda são inconsistentes e, como regra geral, se restringem

a correlacionar resultados experimentais específicos. Assim, os nanofluidos constituem uma oportunidade para pesquisa em diferentes áreas e sob as mais variadas abordagens (HOFFMAN, 2014).

2.3.3 Características gerais dos nanofluidos

Segundo Xuan e Li (2000), com a suspensão de nanopartículas nos fluidos convencionais de transferência de calor, o desempenho da transferência de calor de tais fluidos pode ser significativamente aprimorado, o que é atribuído principalmente a:

- i) As nanopartículas suspensas aumentam a área de superfície e a capacidade térmica do fluido (elevada superfície de contato partícula/fluido);
- ii) As nanopartículas em suspensão aumentam a condutividade térmica efetiva do fluido (nanopartículas de elevada condutividade térmica);
- iii) A interação e colisão entre as partículas, entre as partículas e o fluido e entre as partículas e a superfície de passagem de fluxo é intensificada;
- iv) A potência de bombeamento é baixa quando comparada com aquela necessária para que fluidos puros possam atingir equivalentes níveis de melhoria na transferência de calor;
- v) Os problemas relativos à sedimentação, abrasão e entupimento são reduzidos quando comparados com suspensões convencionais de partículas micrométricas

2.4 Preparação de Nanofluidos

A preparação é o primeiro passo e questão-chave da pesquisa e aplicação de nanofluidos Wu et al., (2009). Ainda assim, existe uma grande dificuldade na obtenção de nanofluidos estáveis, dada a grande chance de formação de aglomerações e sedimentação de nanopartículas. Portanto, preparar nanofluidos estáveis com nanopartículas de diâmetros e concentrações ótimas é um dos grandes desafios, principalmente para aplicação industrial. Porém, existem distintas variáveis de interesse na preparação de nanofluidos, estas podem ser observadas na Fig.2.5.

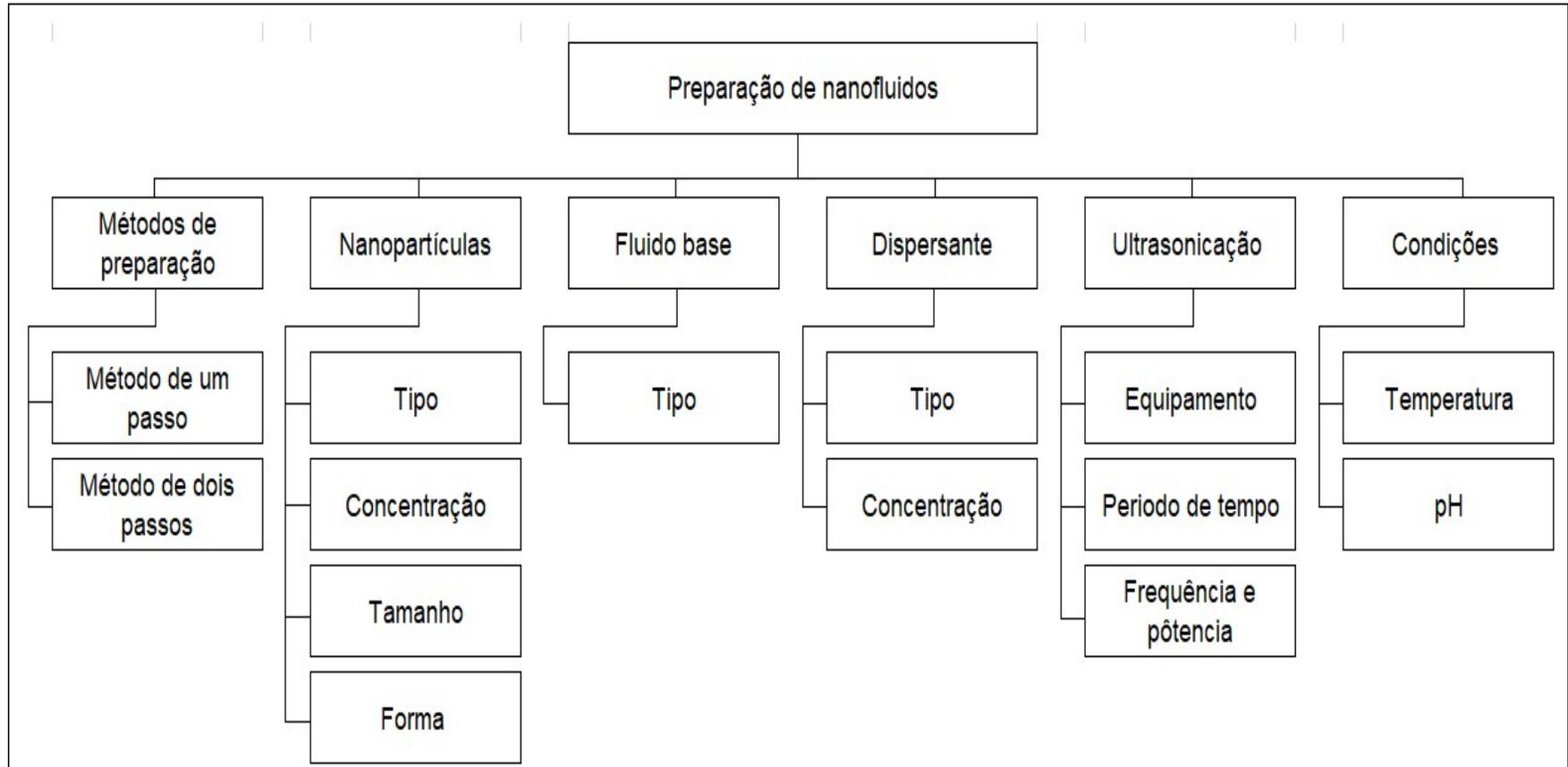


Figura 2.5 - Variáveis de interesse na preparação de nanofluidos

Fonte: Adaptado de Sezer et al., (2019).[Tradução autor].

2.4.1 Modelos clássicos para calcular a concentração de nanopartículas

A concentração de nanopartículas em suspensão é o parâmetro cujo efeito tem sido mais comumente estudado em trabalhos da literatura associados aos nanofluidos. Modelos clássicos de mistura são utilizados para determinar a concentração de nanopartículas, geralmente, referenciada como uma função da concentração de volume de nanopartículas, ϕ , dada por:

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{fb} + V_{np}} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde V_{np} é o volume de nanopartículas e V_{fb} é o volume de fluido base.

Sendo a massa específica dada por $\rho = \frac{m}{V}$, a massa de nanopartículas, m_{np} , a ser utilizada no preparo da suspensão, pode ser determinada em função da concentração volumétrica de nanopartículas, ϕ , e dada massa de fluido base, m_{fb} , por meio das seguintes relações:

$$\phi = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{fb}}{\rho_{fb}} + \frac{m_{np}}{\rho_{np}}} \times 100 \quad (2.2)$$

A concentração de nanopartículas também pode ser representada com o modelo clássico em concentração mássica como:

$$wt. \% = \frac{m_{np}}{m_{np} + m_{fb}} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde m_{np} é a massa da nanopartícula e m_{fb} é a massa do fluido base.

2.4.2 Métodos de preparação

Existem dois métodos utilizados pelos pesquisadores para preparar nanofluidos: o método de um passo e método de dois passos.

2.4.2.1 Método de um passo

O método de um passo consiste em produzir e dispersar simultaneamente as nanopartículas no fluido base. Algumas técnicas como sistemas de síntese por deposição química de vapores, ablação laser, descarga de arco submerso, sol-gel, entre outros, estão disponíveis para a preparação estável de nanofluidos em um único passo.

Entre as vantagens deste método de preparação podem ser destacadas a prevenção a oxidação de nanopartículas, evitar os processos de secagem, armazenamento, transporte e dispersão de nanopartícula, o que pode diminuir a aglomeração das nanopartículas e melhorar na sua estabilidade (ASADI et al., 2019a).

Como desvantagens, observa-se que o método de um passo apresenta um alto custo e baixa escala de produção, também possui a limitação de ser compatível apenas com fluidos de baixa pressão de vapor, além de permitir a presença de resíduos de reagentes por reações incompletas ou de estabilização no nanofluido final quando se aplica a rota química, dificultando a análise dos efeitos das nanopartículas em quantificar as impurezas (OLIVEIRA, 2018).

2.4.2.2 Método de dois passos

No método de dois passos as nanopartículas são sintetizadas e posteriormente dispersas no fluido base. As nanopartículas podem ser formadas por processos físicos, químicos ou mecânicos como pós secos ultrafinos Mahian et al., (2017). O método de dois passos é muito adequado para a produção em larga escala de nanofluidos. Deve-se notar que o método de preparação em duas etapas é a abordagem mais econômica para a preparação de quaisquer nanofluidos (ASADI et al., 2019a).

Todavia, a principal vantagem do método de dois passos é a variedade de nanofluidos que se pode obter, com diversos materiais e tamanhos de nanopartículas, que podem ser dispersas em uma variedade de fluidos base. Por outro lado, é alta a probabilidade de oxidação e aglomeração das nanopartículas, em qualquer das etapas do processo, fato que impõe uma barreira tecnológica para a produção de fluidos por intermédio desse método.

2.5 Estabilidade de nanofluidos

2.5.1 Introdução e conceitos básicos de estabilidade de nanofluidos

Nanofluidos podem perder seu potencial de transferência de calor devido a sua tendência à aglomeração de partículas, afetando a estabilidade da dispersão. Porém, a estabilidade da dispersão de nanopartículas em fluidos base é um parâmetro crucial para sua validação e comercialização em aplicações industriais.

Bergna e Roberts (2005) mencionaram que “Coloidalmente estável” implica que as partículas sólidas não sedimentam nem se agregam a uma velocidade significativa e que as suspensões perdem estabilidade por agregação de partículas coloidais.

Hiemenz e Denker (1997) afirmaram que em estado estacionário, a velocidade de sedimentação de pequenas partículas esféricas num líquido pode ser modelada segundo a lei de Stokes, descrita na Eq. 2.4.

$$V = \frac{2R^2}{9\mu}(\rho_P - \rho_f)g \quad (2.4)$$

Onde V é a velocidade da sedimentação de partículas, R é o radio das partículas esféricas, μ é a viscosidade do meio líquido, ρ_P e ρ_f são a densidade da partícula e do meio líquido, respectivamente, g é a aceleração gravitacional. Essa equação reflete um balanço da gravidade, força flutuante e força de atrito que estão atuando nas nanopartículas suspensas.

De acordo com a equação, as seguintes medidas podem ser tomadas para reduzir a velocidade de sedimentação das nanopartículas em nanofluidos e, posteriormente, para produzir um aprimoramento da estabilidade dos nanofluidos:

- i) Reduzindo o tamanho das partículas R ;
- ii) Aumentar a viscosidade do fluido base μ ;
- iii) Minimizar a diferença de densidade entre as nanopartículas e o fluido base $(\rho_P - \rho_f)$.

Existe uma tendência natural de agregação das partículas em dispersões coloidais, devido ao resultado do movimento browniano e os frequentes choques entre elas, sendo a estabilidade determinada pela interação entre as partículas durante esses choques. A principal causa da agregação de partículas são as forças de atração de van der Waals. Assim, a estabilidade é a consequência da interação repulsiva entre duas camadas de cargas iguais e da afinidade entre a partícula e o solvente (SHAW, 1992).

O comportamento da dispersão de partículas em nanofluidos depende da interação de várias forças microscópicas que são exercidas sobre as nanopartículas ou nanomateriais. Para nanopartículas dentro do fluido base, devido à diferença de densidade, a força da gravidade tende a causar a sedimentação de nanopartículas. Enquanto isso, as nanopartículas no fluido estão passando por movimento térmico aleatório e, portanto, sujeitas à força Browniana, que pode contrabalançar a sedimentação gravitacional e ajudar a dispersar as nanopartículas como pode ser visto na Fig. 2.6 (YU et al., 2017).

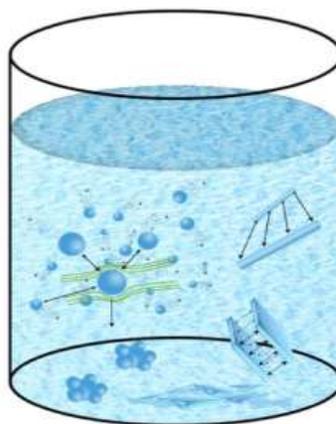


Figura 2.6 - Diagrama esquemático da dispersão de nanofluidos mostrando vários tipos de forças exercidas em uma única nanopartícula e interação entre nanopartículas, nanorods e nanopartículas vizinhas, o que leva à agregação dentro do fluido base.

Fonte: Yu et al., (2017).

As forças de Van der Waals, são sempre uma fonte primária de atração entre as partículas coloidais e estão sempre presentes entre partículas de mesma composição. Assim, para equilibrar essas forças e preparar dispersões estáveis, é necessário que as interações repulsivas entre as partículas sejam no mínimo de igual alcance e magnitude das forças atrativas de Van der Waals. Para promover as forças repulsivas entre as

partículas, diminuindo o efeito das aglomerações na estabilidade dos nanofluidos, métodos mecânicos e químicos são utilizados para prolongar a estabilidade da dispersão das nanopartículas no fluido base.

2.5.2 Mecanismos de estabilização

Segundo Sezer et al., (2019) as forças de interação partícula-partícula e partícula-fluido são responsáveis pela estabilidade dos nanofluidos. Nanopartículas no meio disperso começam a se aglomerar quando as forças de atração interpartículas Van Der Waals dominam as outras forças repulsivas. Em geral, dois tipos de mecanismos de dispersão, estabilização eletrostática e estabilização estérica, foram desenvolvidos para aumentar a interação repulsiva entre partículas, o que pode contrabalançar a força de dispersão de Van der Waals (YU et al., 2017). Um esquema dos mecanismos de estabilização para nanofluidos é apresentado na figura 2.7

No meio de dispersão líquido, um número igual de contra-íons circundará as partículas carregadas para manter a neutralidade geral da carga, formando assim uma dupla camada elétrica com a camada Stern firmemente ligada por dentro e a camada difusa de Gouy na parte externa. Na estabilização eletrostática, é a sobreposição de duplas camadas elétricas que causa a repulsão mútua e fornece estabilidade de dispersão (YU et al., 2017). Na estabilização eletrostática, a carga elétrica da superfície da partícula poderá ser modificada por meio de um ou mais dos seguintes mecanismos:

- i) absorção preferencial de íons;
- ii) dissociação de espécies de superfície carregada;
- iii) substituição isomórfica de íons;
- iv) acumulação ou esgotamento de elétrons na superfície;
- v) adsorção física de espécies carregadas na superfície.

Segundo Yu et al., (2017), estabilização estérica é outra abordagem amplamente usada para dispersões coloidais. Como é apresentado na Fig. 2.7 (B), ela depende da ligação de macromoléculas, tipicamente cadeias de polímeros na superfície das nanopartículas como uma barreira estérica entre as nanopartículas. O polímero pode ser irreversivelmente ligado à superfície da partícula por meio de ligação química, ou apenas fracamente ligado à superfície da partícula por adsorção química ou física. As

cadeias de polímero acopladas devem ter boa compatibilidade com o fluido base, de modo que sirva como bom solvente para expandir o polímero. A alta cobertura da superfície e as longas cadeias poliméricas geralmente apresentam melhor triagem do núcleo interno das partículas. Ao mesmo tempo, a alta concentração de moléculas poliméricas na região entre as nanopartículas resulta em um efeito osmótico. A entropia reduzida e o efeito osmótico induzido juntos contribuem para a base física da estabilização estérica. Comparada à estabilização eletrostática, a estabilização estérica tem as seguintes vantagens:

- i) Como método de estabilização termodinâmico, é mais amplamente aplicável a diferentes sistemas de dispersão;
- ii) Alta concentração de nanopartículas pode ser acomodada e até partículas agregadas temporariamente são redispersíveis;
- iii) A dispersão não é sensível presença de eletrólitos;
- iv) Capacidade de dispersar simultaneamente partículas diferentes dentro do mesmo fluido base.

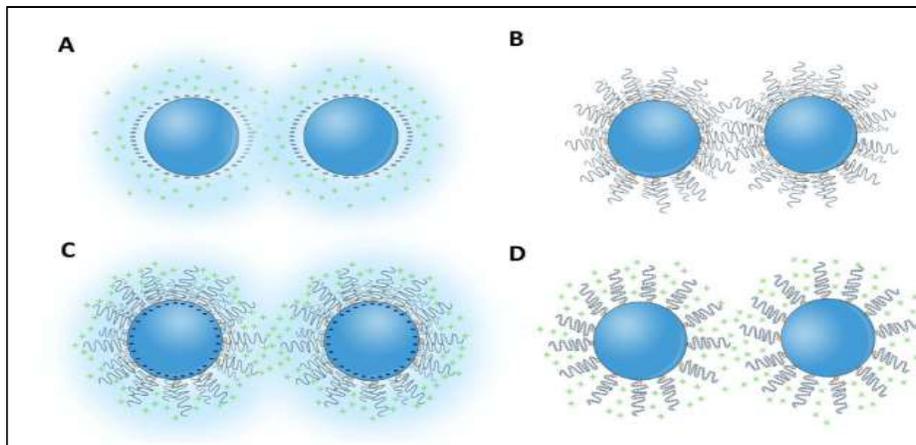


Figura 2.7 Esquema de mecanismos de estabilização para nanofluidos. (A) Estabilização eletrostática, (B) Estabilização estérica, (C) (D) Estabilização eletrostérica
 Fonte: Yu et al., (2017)

Geralmente níveis altos de repulsão são obtidos apenas quando se tem um alto nível de revestimento da superfície das nanopartículas. Para isso, uma forte adsorção é requerida para assegurar um alto nível de revestimento da superfície e um bom solvente garante uma repulsão efetiva das cadeias do revestimento.

Por outro lado, ao contrário dos nanofluidos a base de água, que têm uma operação relativamente estreita devido à congelação e vaporização da água, os nanofluidos a base de óleo tem temperaturas de aplicação muito mais amplas. Para nanofluidos a base de óleo, a estabilização estérica por meio da introdução de ligantes de captação de superfície ou cadeias poliméricas mais longas é a abordagem dominante (YU et al., 2017).

2.5.3 Técnicas para melhorar a estabilidade de nanofluidos

2.5.3.1 Tratamento químico

- Adição de surfactante:

Os surfactantes são agentes estabilizantes amplamente utilizados para melhorar a tensão superficial, molhabilidade e a estabilidade de coloides e dos nanofluidos. Surfactante é uma palavra derivada da concentração da expressão em inglês “*surface active agente*”, termo que significa, literalmente, agente de atividade superficial. Outros termos em português que designa o mesmo tipo de substancia são tensoativo, dispersante ou estabilizante (OLIVEIRA, 2018).

Os surfactantes são amplamente utilizados na pesquisa de nanofluidos para dispersar as nanopartículas uniformemente no fluido base. Os surfactantes podem ser classificados como solúveis em óleo e solúveis em água. Portanto, o tipo de surfactante pode ser selecionado com base na escolha do fluido base (SEZER et al., 2019a)

O surfactante pode ser aniônico (carga negativa), catiônico (carga positiva), não iônico (neutro) ou anfotérico (carga negativa e positivamente) com base na carga em seu grupo principal. Principalmente, a carga superficial das nanopartículas e o tipo de fluido base empregado determinam qual surfactante deve ser selecionado. Vários surfactantes comumente usados na pesquisa de nanofluidos podem ser listados como dodecil sulfato de sódio (SDS), dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS), ácido oleico (OA), cetil brometo de trimetil amônio (CTAB), Brometo de dodecil trimetil amônio (DTAB), goma arábica e polivinilpirrolidona (PVP) (SEZER et al., 2019a).

Botha (2007) dispersou nanopartículas de prata e nanotubos de carbono em óleo de transformador, utilizando diferentes técnicas químicas e físicas. As nanopartículas foram misturadas no óleo uniformemente e oleilamina e ácido oleico foram utilizados para fins de estabilização. Eles relataram uma estabilidade satisfatória.

Embora, a adição de surfactante seja uma forma eficaz de aumentar a capacidade de dispersão das nanopartículas, os surfactantes podem causar vários problemas, tais como a contaminação da superfície de transferência de calor e da superfície das nanopartículas e, com isso aumentar a resistência térmica entre as nanopartículas e o fluido base. Além disso, os surfactantes podem produzir espumas durante o aquecimento, ao passo que aquecimento e resfriamento são processos rotineiros em sistemas de troca de calor.

- Ajuste do pH:

O controle do pH em nanofluidos é uma técnica utilizada para melhorar a dispersão das nanopartículas e evitar a agregação possibilitando preparar um nanofluido estável. Durante as últimas décadas, alguns estudos demonstraram que a variação do pH do nanofluido é um parâmetro importante para aumentar a estabilidade e a condutividade térmica (GOUDARZI et al., 2015)

Considerando essa informação, observa-se que o pH dos nanofluidos está fortemente relacionado com o comportamento reológico das suspensões. As forças adesivas presentes nas nanosuspensões dependem do pH do sistema. Além disso, o grau de ionização tem um efeito significativo nas interações eletrostáticas entre partículas carregadas, e ao se alterar o grau de ionização, a estabilidade pode ser melhorada (OLIVEIRA, 2018).

Para a investigação desse método, é crucial a determinação do ponto isoelétrico da dispersão. Ponto isoelétrico ou de carga zero é o valor de pH no qual uma molécula ou nanopartícula apresenta a carga elétrica nula. Nesse ponto, há um equilíbrio entre as cargas negativas e positivas dos grupamentos iônicos, sendo utilizado em nanofluidos para a determinação da estabilidade da dispersão. O ponto isoelétrico é determinado em análises de potencial zeta, e este é um indicador da estabilidade da dispersão. Para baixos valores de pH a concentração de ions H^+ é maior, e maior a prevalência de partículas com cargas positivas na dispersão. Em contrapartida, quanto maior o valor do pH, menor a quantidade de partículas carregadas positivamente, havendo uma prevalência de cargas negativas. A determinação do ponto isoelétrico é importante devido a existência de cargas positivas e negativas influenciar na interação entre as partículas e as moléculas do líquido, além de estabelecer um estado de repulsão entre as próprias partículas

umentando a interação com o líquido e por consequência, favorecendo a estabilidade (OLIVEIRA, 2018).

- Tratamento de modificação superficial:

Outro método de estabilização química é a modificação da superfície que é aplicada às nanopartículas antes de dispersá-las no fluido base. O uso de nanopartículas funcionalizadas (com a superfície modificada) é uma técnica promissora adequada para garantir estabilidade aos nanofluidos Li et al., (2015). Basicamente, a superfície da nanopartícula é modificada pela ligação de um componente hidrofóbico ou hidrofílico, dependendo da aplicação, para melhorar a estabilidade desta quando dispersa no fluido base. As vantagens desse método de estabilização sobre outros métodos dizem respeito ao fato das partículas modificadas tenderem a permanecer suspensas por mais tempo, e o efeito sobre as propriedades termofísicas dos nanofluidos ser insignificante (OLIVEIRA, 2018).

Geralmente, uma quantidade excessiva de surfactante é necessária para estabilizar completamente as nanopartículas no fluido base. A adição do terceiro componente no fluido afeta as propriedades termofísicas, especialmente a viscosidade do fluido. A classificação do óleo térmico para diferentes aplicações depende do índice de viscosidade de óleo. Desse modo, uma ligeira alteração na viscosidade do óleo pode torna-lo inadequado para a aplicação desejada. Cabe enfatizar que, estudos mencionaram aspectos negativos dos surfactantes, especialmente durante operações de alta temperatura. A solução alternativa é anexar o grupo funcional desejado à partícula usando o método de modificação de superfície (ILYAS et al., 2017a).

LI et al., (2010) produziram nanofluidos de prata a base de óleo. As nanopartículas de prata foram produzidas por rota química. Ácido oleico e n-butilamina foram utilizados durante a síntese das nanopartículas de prata para modificar a superfície, sendo as moléculas de ácido oleico ligadas para a formação de uma camada protetora e a n-butilamina atuando como estabilizante. Os nanofluidos produzidos foram avaliados e classificados como altamente estáveis, confirmando o bom desempenho da rota utilizada.

LI et al., (2012) utilizaram a modificação de superfície de nanopartículas de Fe_3O_4 para preparar nanofluidos a base de óleo isolante vegetal e avaliar as propriedades dielétricas. Utilizou-se ácido oleico para revestir a superfície das

nanopartículas em solução de etanol antes da dispersão no óleo vegetal. Como resultado, obteve-se uma dispersão uniforme e as nanopartículas permaneceram dispersas por 30 dias após a preparação. Esses resultados comprovam o sucesso do método, sendo uma metodologia satisfatória a ser aplicada na estabilização de nanofluidos.

Recentemente, Marcucci (2018) preparou nanofluido a base de óleo. Com a finalidade de melhorar a estabilidade dos nanolubrificantes, nanopartículas de diamante foram revestidas com ácido oleico. Foi constatada uma dispersão estável de nanopartículas no óleo após 15 dias.

Oliveira (2018) realizou a modificação superficial de nanopartículas de diamante para preparar nanofluidos a base de óleo mineral. Foi relatado que a utilização de ácido oleico promoveu a formação de uma camada orgânica na superfície das nanopartículas de diamante causando o impedimento estérico entre elas e promovendo a estabilização. Os resultados da análise de estabilidade abordada mostraram uma alta estabilidade dos nanofluidos produzidos. Finalmente foi concluído que as técnicas de modificação superficial foram eficazes na tentativa de melhorar a estabilidade dos nanofluidos. Um esquema representativo do processo de síntese utilizando ácido oleico como estabilizante pode ser visto na Fig. 2.8.

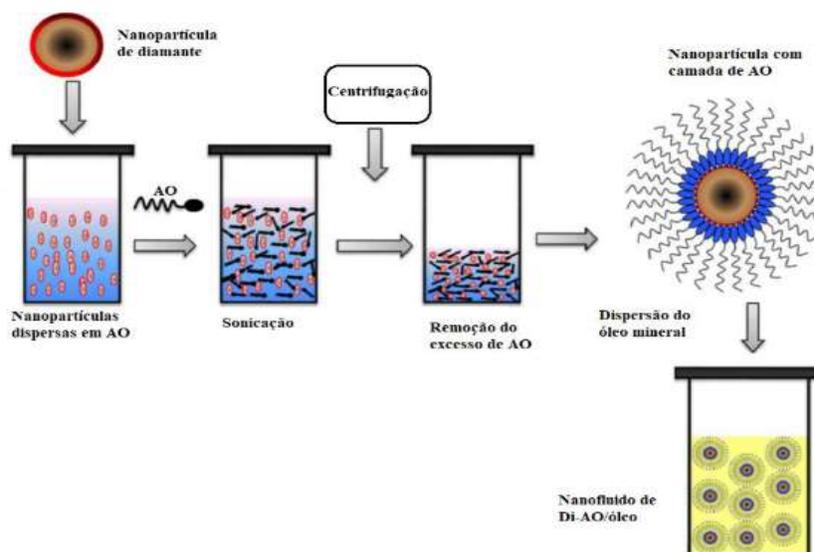


Figura 2.8 Esquema representativo da síntese de nanofluidos de diamante utilizando ácido oleico como agente estabilizante

Fonte: Oliveira, 2018

2.5.4 Tratamento físico ou mecânico – Sonicação por alta frequência

De acordo com Hwang et al., (2008) na produção de nanofluidos são obtidos melhores resultados quando se utiliza o processo de sonicação de alta frequência. Com base nessa informação, na Fig. 2.9, são mostradas as imagens obtidas por Hwang et al., (2008) com o microscópio eletrônico de transmissão (MET) para nanofluidos a base de óleo obtidos a partir de diferentes processos de sinterização, em que se pode observar que o método que apresenta menos aglomerações de partículas é o sonicador de alta frequência.

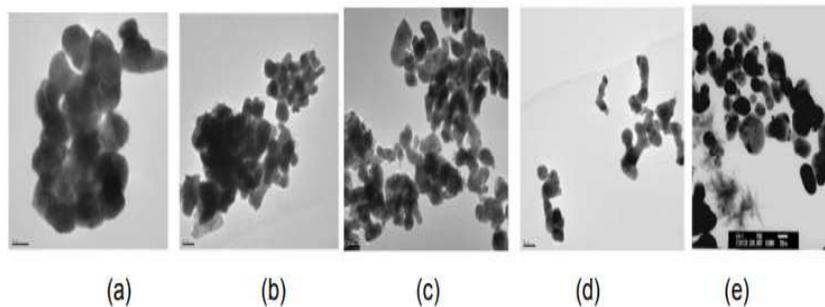


Figura 2.9 Microscopia (MET) para nanofluidos a base de óleo produzidos mediante o método de dois passos por: (a) agitação manual; (b) agitação mecânica; (c) banho ultrassônico; (d) Sonicador de alta frequência; (e) Homogeneizador de alta pressão.

Fonte: Hwang et al. (2008)

Dessa maneira, com o propósito de evitar aglomerações, um dos tratamentos físicos mais utilizado é a sonicação por alta frequência. Este método físico depende do emprego de ondas ultrassônicas através do fluido, pode ser usado para melhorar a estabilidade do nanofluido, rompendo a força de atração das nanopartículas nos sedimentos (ALI et al., 2018). Existem dois tipos de dispositivos ultrassonicadores empregados por diferentes autores na literatura especializada, o tipo sonda e o tipo banho.

Conforme as pesquisas realizadas na área, o uso de processador ultrassônico de alta frequência é uma parte inevitável na preparação de nanofluidos em dois passos. Diferentes autores provam que isto ajuda a quebrar as aglomerações de nanopartículas e faz um nanofluido estável de longa data com distribuição uniforme de partículas. Uma representação esquemática do processo de preparação com sonda ultrassônica pode ser observada na Fig. 2.10.

É importante ressaltar que na revisão bibliográfica realizada podem ser observadas distintas potências aplicadas, com variados tempos e temperaturas de sonicação. No entanto, ainda que este procedimento se mostra apropriado para a obtenção de nanofluidos com dispersão coloidal estável, a influência dessas variáveis no processo de sonicação continua sendo alvo de pesquisa na comunidade científica.

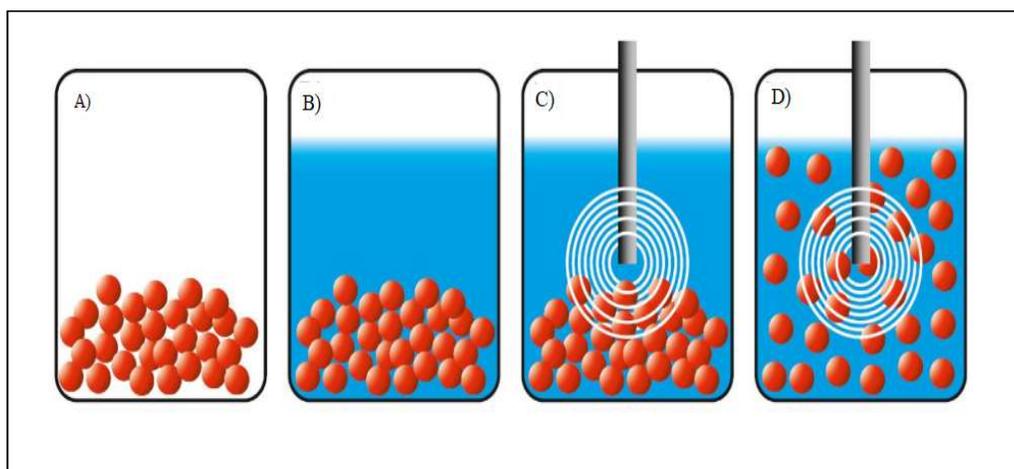


Figura 2.10 - Representação esquemática do processo de preparação de nanofluidos pelo método de dois passos com sonda ultrassônica. A) Nanopartículas sintetizadas B) Adição de fluido base C) Ultrassônicação de partículas aglomeradas D) Nanofluido estável

Fonte: Adaptada de Asadi et al., 2019

(ASADI; ASADI, 2016) dispersaram as nanopartículas híbridas de ZnO e MWCNT em um óleo de motor (10W40) empregando o método de duas etapas. Na primeira etapa, um agitador magnético foi empregado por 2 horas para misturar as nanopartículas no fluido base. Em seguida, para fazer um nanofluido uniforme e de longa data estável e quebrar a possível aglomeração das nanopartículas, um processador ultrassônico (1200 W, 20kHz, Topsonic, Irã) foi usado por 1 hora. Os autores relataram que, empregando o método de dois passos, a estabilidade do nanofluido é alcançada por pelo menos uma semana e não evidenciaram sedimentação.

(SAEEDINIA et al., 2012a) dispersou nanopartículas de CuO (50 nm, pureza 99%) em óleo em quatro diferentes concentrações de peso de 0,2, 0,5, 1 e 2 vols. %. Os pesquisadores utilizaram uma sonda ultrassônica (400 W, 24 kHz) para quebrar a possível aglomeração de nanopartículas no fluido base. Relatou-se que não foi

observada sedimentação nas primeiras 24 horas da preparação pela observação. Todavia, a sedimentação foi observada após uma semana de preparação.

(FAKOOR PAKDAMAN et al., 2012) dispersaram nanopartículas de MWCNT em óleo usando o método de dois passos. Eles dispersaram as nanopartículas em três concentrações de 0,1, 0,2 e 0,4 vol.% sem uso de surfactante. Primeiramente, empregando um misturador elétrico por 1 hora, o MWCNT foi dispersado no fluido base. Em seguida, a suspensão foi submetida a uma sonda ultrassônica (400 W, 24kHz) por 6 horas para quebrar as possíveis aglomerações de nanopartículas no fluido base. Relatou-se que o começo da sedimentação foi observado após de 24 horas da sonicação, por tanto, ao início dos experimentos, os nanofluidos foram uniformizados pelo processo de sonicação mencionado.

(ILYAS et al., 2017b) dispersaram nanotubos de carbono em óleo usando sonda ultrassônica com uma frequência de 20 kHz durante um período de tempo de 45 minutos com 70 % da potência e 30 % de pulsos para todas as amostras. No entanto, os autores relataram um significativo aumento da temperatura da amostra durante o processo. Para superar esse problema, os nanofluidos foram sonicados em banho de água de resfriamento e a temperatura da amostra foi mantida a 20 °C durante o processo.

(AMIRI et al., 2015) dispersaram nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizadas em óleo térmico com frações de volume de 0,001 %, 0,01 %, 0,05 % e 0,1 %. Na preparação, utilizaram o banho ultrassônico por cerca de 30 minutos, à temperatura de 120 °C e uma potência de 700 W. Os nanofluidos mostraram uma completa estabilidade após 6 meses.

2.5.5 Métodos de análise de estabilidade de nanofluidos

Conforme o anteriormente mencionado, a estabilidade dos nanofluidos é requisito essencial para sua aplicação nos sistemas térmicos. A caracterização apropriada da estabilidade da dispersão de nanofluidos é crucial para desenvolver estratégias de dispersão e explorar as aplicações práticas de nanofluidos térmicos (YU et al., 2017). Desse modo, muitas técnicas são encontradas na literatura especializada e aplicadas para a avaliação da estabilidade de nanofluidos. Nesta seção, os métodos de análise de estabilidade usados por numerosos autores serão revisados e apresentados.

2.5.5.1 Método de inspeção visual

A sedimentação de nanopartículas em nanosuspensões é um fenômeno natural devido à gravidade que é imposta pela agregação entre partículas. A análise de inspeção visual é uma técnica simples para avaliar a estabilidade dos nanofluidos. Devido ao tamanho das nanopartículas dispersas em um líquido, a tendência em se aglomerar é alta e isso faz com que o diâmetro médio aumente, permitindo a ação da gravidade e a sedimentação natural.

Existem três tipos de sedimentação em nanosuspensões, isto é, sedimentação de tipo disperso, sedimentação de tipo floculado e assentamento de tipo misto. O método mais simples e mais utilizado para avaliar a estabilidade de nanofluidos é o método da sedimentação. O nanofluido é considerado estável quando a concentração de partículas for constante. A Fig. 2.11 apresenta os diferentes cenários de nanofluidos estáveis e instáveis.

Relata-se que o método de inspeção visual é mais comum para avaliar a estabilidade de nanofluidos. Essa técnica consiste na observação de imagens registradas após a preparação do fluido e depois de um período de tempo. Porém, para esse tipo de análise, baseada na visão humana não é eficiente, pois é incapaz de verificar as diferenças de padrões em pequenas variações de luz, cor, brilho e intensidade, tornando a técnica um tanto quanto imprecisa e com erros sistemáticos devido às diferentes interpretações que podem ser feitas a partir da observação visual de uma imagem.

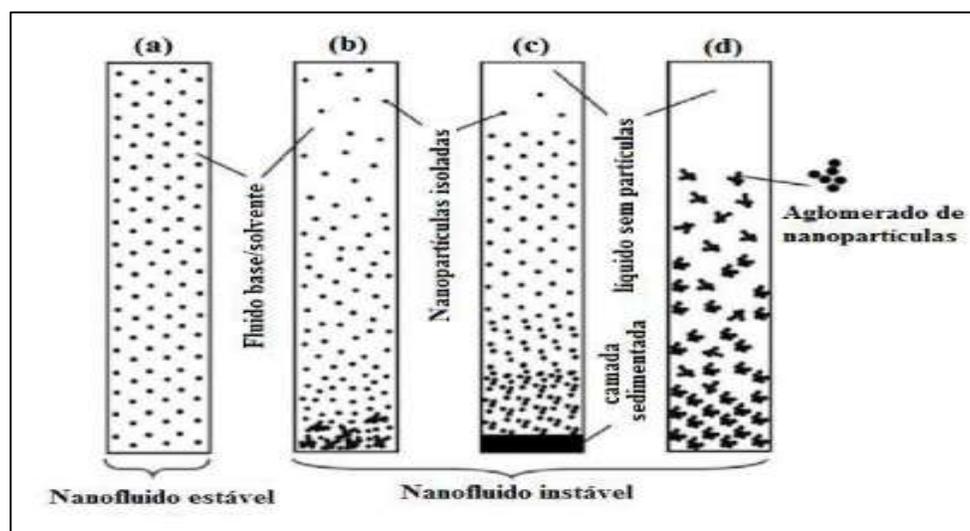


Figura 2.11 - Diferentes cenários de nanofluidos estáveis e instáveis

Fonte: Oliveira, 2018

2.5.5.2 Potencial Zeta

Potencial zeta, também conhecido por potencial eletrocinético, indica o grau de repulsão entre as partículas adjacentes numa mistura. Quando um nanofluido possui um potencial zeta elevado, as nanopartículas têm um grau de repulsão elevado conferindo a estabilidade da solução. Para potenciais zeta baixos, as nanopartículas tendem a se agregar (HUANG et al., 2009).

Sabe-se que a qualidade de dispersão das partículas em fluidos base tem efeito direto sobre a estabilidade dos nanofluidos. A fim de investigar a estabilidade das amostras, a análise do potencial zeta é realizada nas amostras em dois momentos diferentes, logo após a preparação e após sete dias de preparação. Foi discutido em diferentes pesquisa que as amostras com um valor de potencial zeta absoluto abaixo de 30 mV são consideradas como estabilidade inaceitável, entre 30 mV e 45 mV são moderadamente aceitáveis e maiores que 45 mV mostram excelente estabilidade com possível sedimentação (ASADI et al., 2018a).

Aberoumand e Jafarimoghaddam (2016) mediram o potencial zeta de nanofluidos híbridos a base de óleo de transformador como forma de avaliar a estabilidade. De acordo com os autores, a avaliação da estabilidade pela medição do potencial zeta está relacionada com as forças de repulsão eletrostática entre as nanopartículas. Havendo uma alta repulsão, pode-se concluir que as existem poucas colisões entre as nanopartículas e o nanofluido é considerado estável. Seus resultados demonstraram boa estabilidade para todas as concentrações sólidas de partículas (1%, 2% e 4% em massa).

2.5.5.3 Espectroscopia UV-VIS

Recentemente, um novo método que pode ser usado para estimar a concentração da suspensão com o aumento do tempo de sedimento foi introduzido na avaliação de estabilidade de nanofluidos. Trata-se da Espectrofotometria UV-VIS, decorrentes do qual as medições do espectrofotômetro ultravioleta-visível (UV-VIS) tem sido utilizadas para caracterizar quantitativamente a estabilidade coloidal das dispersões (GHADIMI et al., 2011). A base dessa medida é a relação linear entre absorbância (A) e a concentração sólida de partículas (ϕ), apresentada pela Lei de Lambert-Beer.

Convém caracterizar que a espectrofotometria é o estudo da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Os fenômenos físico-químicos que são objeto de

estudo se caracterizam como interações (reflexão, refração, espalhamento elástico, interferência e difração) ou alterações nos níveis de energia de moléculas ou átomos.

As radiações eletromagnéticas com comprimento de onda entre 380 e 750 nm são visíveis ao olho humano. Entretanto, luz visível constitui uma parcela muito pequena no espectro eletromagnético. A zona do espectro cujas radiações possuem um comprimento de onda abaixo de 380 nm é denominada de ultravioleta (UV). Comprimentos de onda acima de 750 nm correspondem à zona infravermelha.

A espectrofotometria no ultravioleta visível (UV-VIS) envolve a espectroscopia de fótons (espectrofotometria). Ela utiliza luz na faixa do visível, do ultravioleta (UV) próximo e do infravermelho próximo. Nessas faixas de energia as moléculas sofrem transações eletrônicas. O método utilizado para determinar de um modo quantitativo a concentração de substâncias em solução que absorvem radiação, é a Lei de Lambert-Beer.

O espectrofotômetro é um instrumento de análise, amplamente utilizado em laboratórios de pesquisa, capaz de medir e comparar a quantidade de luz (radiação eletromagnética) absorvida, transmitida ou refletida por uma determinada amostra, seja ela solução, sólido transparente ou sólido opaco. Para um maior entendimento, um esquema dos componentes fundamentais do espectrofotômetro comumente utilizado é apresentado na Fig. 2.12.

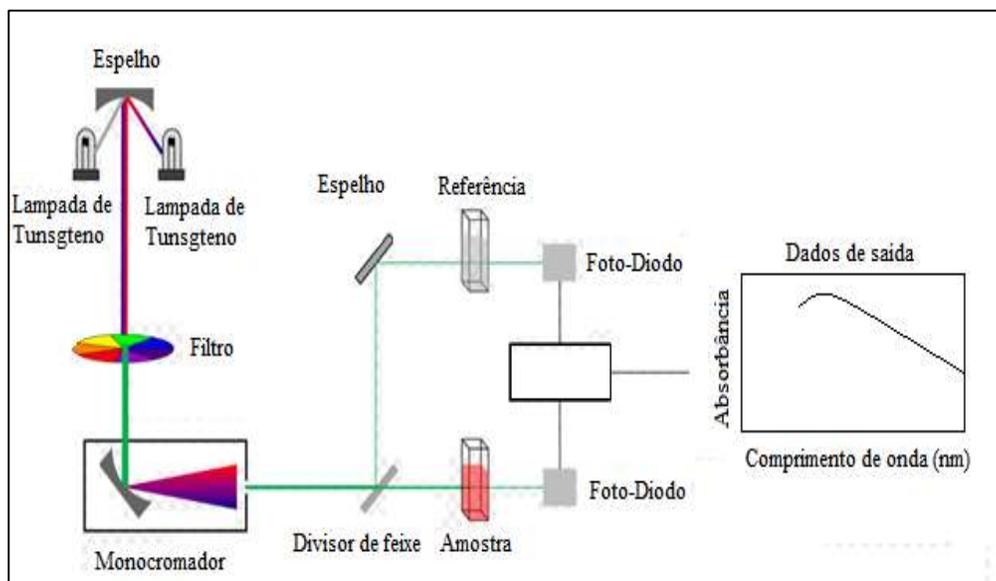


Figura 2.12 Esquema de espectrofotômetro UV-VIS

Fonte: Autor

A estabilidade da suspensão é resolvida medindo o volume do sedimento versus o tempo do sedimento. Jiang et al., (2003) foram os primeiros pesquisadores em estimar a sedimentação usando espectrofotometria UV-VIS para nanosuspensões de carbono. Conforme esse método, o primeiro passo é encontrar o pico da absorbância das nanopartículas dispersas em suspensão muito diluída por varredura. Como a concentração da suspensão tem uma relação linear com a absorbância, a preparação de um padrão para ajustar uma relação linear a pelo menos três concentrações diferentes de diluição deve ser o próximo passo do procedimento segundo esse método. A medição da estabilidade relativa será seguida pela preparação da concentração desejada de nanofluido e deixada de lado por alguns dias. Sempre que for necessário, é importante verificar a estabilidade relativa, e a concentração do sobrenadante será medida pelo espectrofotômetro UV-VIS, podendo ser plotada contra o tempo (GHADIMI et al., 2011).

Jiang et al. (2003) estudaram a estabilidade coloidal de nanofluidos de nanotubos de carbono em solução aquosa. Os autores relataram que a absorção de nanotubos de carbono apareceu em 253 nm. Este fenômeno foi tomado como base para a determinação da concentração de nanotubos de carbono. A curva de calibração linear foi construída em um comprimento de onda de 253 nm para dispersões de nanotubos de carbono sem aditivos. Para dispersões de nanotubos de carbono com adsorção de SDS, a mesmas concentrações da solução aquosa foram utilizadas como referências para eliminar a absorbância de SDS nas suspensões. Assim, uma curva padrão foi determinada de forma semelhante. Dispersões coloidais estáveis de nanotubos de carbono são observadas com o auxílio de SDS, diminuído apenas 15 % em comparação com uma diminuição de 50 % para os nanotubos de carbono nus. Os pesquisadores concluíram que a interação dos CNT's e SDS através do segmento hidrofóbico de cadeia linear longa e um segmento hidrofílico terminal prova ser um dispersante adequado para a dispersão estável de nanotubos de carbono em meio aquoso.

Hwang et al., (2006) estudaram o efeito da dispersão de diferentes tipos de nanopartícula na estabilidade coloidal usando espectrofotômetro UV-VIS para estimar a concentração da suspensão com o aumento do tempo de sedimentação. O pico da absorbância foi encontrado em 397 nm para nanotubos de carbono de paredes múltiplas em óleo. Eles apresentaram uma relação linear obtida entre a concentração sólida de partículas em suspensão. Os resultados mostram que a absorbância dos nanotubos de carbono decresce com o tempo. Os autores declararam que os nanofluidos com

nanotubos de carbono a base de óleo mostraram a pior estabilidade e sugeriram o uso da adição de surfactante para melhorar a suspensão.

Rehman et al., (2019) estudaram a estabilidade de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo. O espectro em todos os casos foi tomado dentro da faixa de 400-800 nm e os valores dos picos iniciais estão na faixa de 400 nm. Eles declararam uma diminuição da absorvância com o aumento do tempo de sedimentação e relataram uma alta estabilidade da dispersão mesmo após uma semana da preparação dos nanofluidos.

Conforme mencionado anteriormente, um dos primeiros passos para avaliar a estabilidade da dispersão de nanopartículas por meio desse método consiste em fazer uma varredura do espectro e encontrar o pico da absorvância das nanopartículas. Entretanto, os resultados relatados na literatura especializada demonstram que não há pico específico para nanofluidos de nanotubos de carbono em diferentes frações de peso (REHMAN et al., 2019a). Nesse sentido pode-se citar alguns exemplos como CNT's-água destilada (253nm) (JIANG et al., 2003); MWCNT-agua destilada (260 nm) (YU et al., 2007); MWCNT-agua destilada (500 nm) (RASTOGI et al., 2008); MWCNT-Óleo (397 nm) (VAKILI-NEZHAAD; DORANY, 2009); CNT-agua destilada (384 nm) (RASHMI et al., 2011). A forma dos espectros de adsorção também é diferente em todos os casos (REHMAN et al., 2019a).

2.6 Propriedades termofísicas de nanofluidos

Conforme descrito por Gupta et al., (2017) a incorporação de nanopartículas em fluidos base acarreta mudanças em propriedades termofísicas como: condutividade térmica, viscosidade, massa específica e calor específico. O estudo profundo dessas propriedades, abordando seus parâmetros ou fatores de influência separadamente é essencial para desenvolver nanofluidos que possam aprimorar o desempenho dos sistemas térmicos (GUPTA et al., 2017a). A pesquisa bibliográfica referente às propriedades termofísicas dos nanofluidos mencionadas será apresentada a seguir.

2.6.1 Condutividade térmica de nanofluidos

A condutividade térmica é definida como a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de transferência de calor por um material com a área de transferência de calor e a variação de temperatura com a distância no material, podendo ser entendida como a capacidade de um material em conduzir calor (Incropera, 2001).

Muitas experiências, bem como pesquisas teóricas, têm sido realizadas para investigar a mudança na condutividade térmica de nanofluidos (k_{nf}). Segundo Gupta et al., (2017) a condutividade térmica é a propriedade termofísicas de maior influência no desempenho térmico dos nanofluidos devido à capacidade de condução de calor aumentada com adição das nanopartículas. Este fato, até hoje tem sido o principal foco das pesquisas envolvendo nanofluidos e diversos resultados já foram obtidos confirmando um aumento na condutividade térmica em nanofluidos quando comparados com o fluido base.

Numerosos pesquisadores estudam diferentes fatores que influenciam na condutividade térmica dos nanofluidos e visam por conseguir incrementar as ordens de grandeza dos fluidos base. No entanto, a literatura especializada da área afirma que os resultados encontrados são controversos mesmo quando se compara um mesmo tipo de nanofluido o que leva à conclusão de que diversos fatores são influentes na condutividade térmica (CARDENAS CONTRERAS, 2017).

Em relação à natureza da nanopartícula, geralmente as pesquisas realizadas mostram que existe uma intensificação maior da condutividade térmica dos nanofluidos quando a condutividade térmica da nanopartícula é maior. Diferentes autores têm estudado este efeito. Por exemplo, (ASADI et al., 2019b) investigaram experimentalmente as propriedades termofísicas e a transferência de calor em nanofluidos de ZnO/Óleo mineral e MgO/Óleo mineral. A condutividade térmica foi medida na mesma faixa de 15 – 55 °C e concentrações sólidas idênticas. Os resultados revelaram que o máximo incremento da condutividade térmica foi sobre 28 % e 32 % para ZnO/Óleo e MgO/Óleo, respectivamente. (ASADI; POURFATTAH, 2019).

O fluido base é outro dos fatores que influenciam na condutividade térmica dos nanofluidos. Hwang et al., (2006) estudaram o efeito da dispersão de diferentes tipos de nanopartículas e fluidos base na condutividade térmica. Nanofluidos de nanotubos de carbono mostraram aumentos na condutividade térmica tanto dispersos em água quanto em óleo mineral. Os resultados apresentaram um maior aumento na condutividade térmica dos nanofluidos a base de óleo. Em vista disso, eles relataram que estes resultados permitem considerar que o maior incremento na condutividade térmica pode ser obtido para um fluido base de baixa condutividade térmica.

Com a finalidade de ter uma melhor compreensão, os principais fatores que influenciam a condutividade térmica podem ser vistos na Fig. 2.13, baseada no estudo proposto por Cárdenas Contreras (2017).

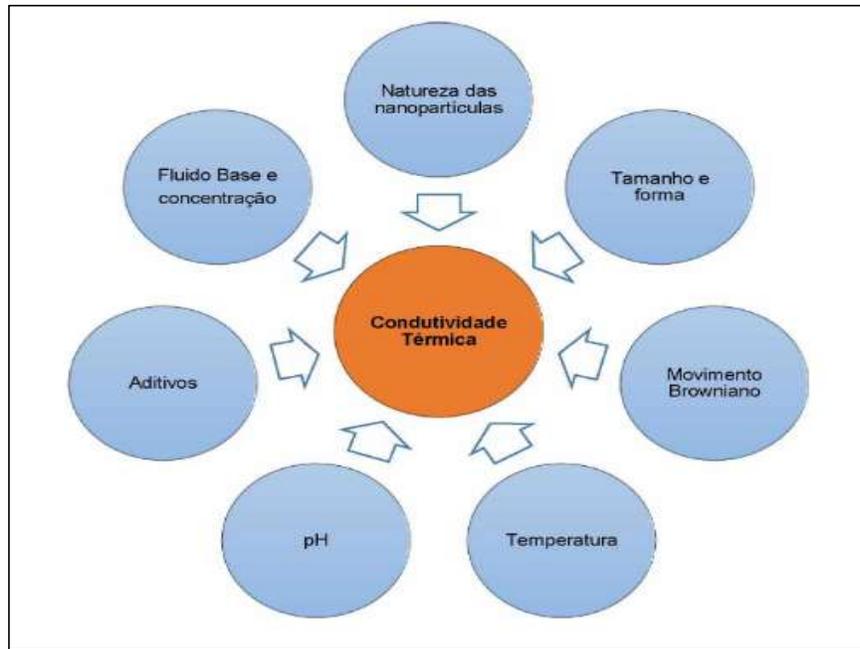


Figura 2.13 Fatores que influenciam na condutividade térmica de nanofluidos

Fonte: Adaptado de Cárdenas (2017)

Alawi et al., (2018) mediram a condutividade térmica de vários nanofluidos de óxidos metálicos, como Al_2O_3 / água, CuO / água, ZnO / água e SiO_2 / água. Observou-se que a melhor morfologia de nanopartícula para melhoria na condutividade térmica depende da natureza da nanopartícula.

O tamanho da partícula é outro parâmetro de interesse na condutividade térmica de nanofluidos. A tendência geral dos resultados experimentais mostra que a condutividade térmica aumenta com a diminuição do tamanho ou diâmetro das nanopartículas Wang e Mujumdar (2007), Chopkar et al., (2008) e Hemmat Esfe et al., (2015), observaram aumento da condutividade térmica com o decréscimo no tamanho da partícula. Por outro lado, Liu et al., (2015) observaram que a probabilidade de agregação e a estabilidade da dispersão se deteriora com o aumento do tamanho das partículas.

Desse modo, manter a dispersão de nanopartículas estáveis nos fluidos base por longos períodos de tempo é um dos desafios que podem ser contornados com a aplicação de aditivo. Estudos tem revelado que os nanofluidos que apresentaram períodos mais longos de estabilidade, apresentaram incrementos significativos na condutividade (YU et al., 2017).

Existem numerosos estudos do efeito da concentração sólida de partículas na condutividade térmica de nanofluidos. Ainda assim, alguns estudos são controversos, mas a grande maioria dos estudos realizados apresentam uma relação direta do incremento da condutividade térmica dos nanofluidos com o aumento da concentração de materiais nanoparticulados (SEZER et al., 2019).

A influência da temperatura na condutividade térmica dos nanofluidos continua sendo discutida. Na maioria dos estudos é observado um significativo aumento da condutividade térmica do nanofluido com aumento da temperatura, efeito descrito no trabalho de (DAS et al., 2003). Outras pesquisas apresentam uma relação menor desse efeito com nanofluidos e existe relatos que demonstram a diminuição da condutividade térmica com incrementos de temperatura, principalmente encontrados em trabalhos com óleos como fluido base. Por exemplo, Cárdenas (2019) investigou experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT/Óleo e Ag/Óleo. Os resultados mostraram um aumento na condutividade térmica com o incremento da concentração sólida de partículas para os dois grupos de nanofluidos. Além disso, um comportamento decrescente da condutividade térmica com o aumento da temperatura para o fluido base e os nanofluidos. Os máximos incrementos relatados para a maior concentração de nanopartículas foram em média de 3,6 % e 18,6%, para os nanofluidos de Ag/Óleo e MWCNT/Óleo, respectivamente.

Aberoumand et al., (2016) investigaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de Ag/Óleo. Os autores relataram um incremento na condutividade térmica dos nanofluidos quando comparados com o fluido base. Além disso, um comportamento decrescente do fluido base em função da temperatura foi relatado. O maior incremento obtido para o nanofluido de maior concentração de nanopartículas foi de 35,77 %. Eles atribuíram o incremento da condutividade térmica ao movimento Browniano de nanopartículas no fluido e a estabilidade dos nanofluidos.

Para fins de comparação, alguns aumentos significativos na condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo encontrados na literatura pode ser observado na Fig. 2.14 em função da concentração de nanopartículas. É observado que existe uma grande controvérsia nos resultados experimentais de aumentos na condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo em relação à concentração sólida de partículas empregada por distintos autores. Essa divergência dos resultados pode dever-se a outros fatores que alinhados com a concentração, continuam sendo objeto de pesquisa nesta área.

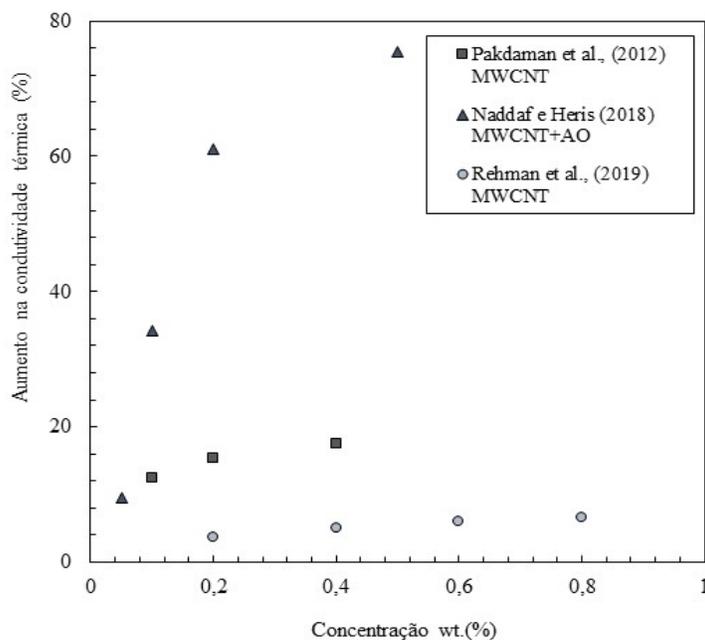


Figura 2.14 Aumento na condutividade térmica de nanofluidos em função da concentração sólida de nanopartículas encontradas na literatura em estudos sobre nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo

Fonte: Autor

Pakdaman et al., (2012) realizaram uma investigação teórico-experimental da condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT/Óleo. Os resultados experimentais mostraram um aumento da condutividade térmica com o incremento da concentração de nanopartículas. O comportamento da condutividade térmica no fluido base foi decrescente. Em contraste com esses resultados, os comportamentos na condutividade térmica de nanofluidos e do fluido base foi atribuído à natureza das nanopartículas nos valores de condutividade térmica. Os resultados dos modelos teóricos adotados mostraram um comportamento decrescente da condutividade térmica com a temperatura também em desacordo com as tendências das medições experimentais.

A influência da temperatura na condutividade térmica dos nanofluidos continua sendo discutida. Alguns trabalhos mostraram intensificação da condutividade térmica com o incremento da temperatura. Rehman et al., (2019), por exemplo, analisaram o efeito significativo da temperatura no incremento da condutividade térmica. Os

resultados mostraram que a condutividade térmica aumenta com o incremento da concentração sólida de nanopartículas. Eles atribuíram este comportamento a que o aumento na temperatura dos nanofluidos causou um aumento da energia cinética, que acarreta a um aumento na colisão das moléculas devido ao seu movimento browniano.

Com base nos resultados obtidos pelos pesquisadores, vários parâmetros afetam a condutividade térmica dos nanofluidos. Temperatura, concentração de fase sólida, tamanho das nanoestruturas e sua forma estão entre os mais influentes. No entanto, os resultados ainda são controversos e a influência desses parâmetros continua sendo discutida pelos pesquisadores. Um resumo de estudos sobre condutividade térmica de nanofluidos a base de óleo é apresentada na Tab. 2.1.

2.6.1.4 Modelos clássicos e experimentais de condutividade térmica de nanofluidos

Além de estudos experimentais, vários modelos são representados para prever a condutividade térmica de nanofluidos propondo correlações e / ou abordagens de redes neurais artificiais (AHMADI et al., 2018). Entre os modelos clássicos, o modelo que tem sido amplamente utilizado na literatura é o desenvolvido por Hamilton e Crosser (1962), eles introduziram e consideraram o parâmetro fator de forma da partícula no modelo.

Alguns outros modelos clássicos têm sido amplamente utilizados para prever a condutividade térmica de nanofluidos. No entanto, as comparações entre dados experimentais para condutividade térmica dos nanofluidos com as previsões dos modelos clássicos geralmente não são satisfatórias.

Nesse sentido, distintos autores têm proposto diferentes correlações para prever a condutividade térmica de nanofluidos baseados nos seus resultados experimentais. um resumo de correlações com base empírica propostas por distintos autores para prever a condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo é apresentada na Tab. 2.2.

Tabela 2.1 Resumo de estudos sobre condutividade térmica de nanofluidos a base de óleo encontrados na literatura

Autor	Nanofluidos	Concentração	Temperatura (°C)	Destaque condutividade térmica
(LIU et al., 2005)	MWCNTs/Óleo mineral	1 - 2 vol.%	10 - 80	* Na concentração volumétrica de 2 % houve o aumento máximo na condutividade térmica de 30 %.
(YANG et al., 2006)	MWCNTs/Óleo mineral	0,3 - 0,8 wt. %	25	* Aumento de condutividade maior que 200% para maior concentração.
(BOTHA et al., 2011)	SiO ₂ - Ag / Óleo de transformador	0,07 - 4,4 wt. %	-	*Maior incremento de condutividade térmica de 15 % para a maior concentração em prata do nanofluido híbrido.
(FAKOOR PAKDAMAN et al., 2012)	MWCNTs/Óleo mineral	0.1, 0.2 e 0.4 wt. %	40 - 70	*Incremento de 15 % na maior temperatura (70 °C) para a maior concentração sólida de 0,4 wt. %.
(SAEEDINIA et al., 2012a)	CuO/Óleo mineral	0,2 - 2 wt. %	24 - 70	O máximo aumento de condutividade térmica encontrado foi de 6.2% com fração mássica de nanopartícula de 2 % na temperatura máxima (70 °C).
(ETTEFAGHI et al., 2013a)	MWCNTs/Óleo de motor SAE W50	0.1 - 0.5 wt. %	20	*Incremento de 22,7 % na condutividade térmica para a concentração mássica de 0,5 %.
(ABEROUMAND; JAFARIMOGHADDAM, 2017)	Cobre/Óleo mineral	0.2, 0.5 e 1 wt. %	40 - 70	*49 % aumento para a maior temperatura (70 °C) e concentração de nanopartículas.

Fonte: Autor

Tabela 2.2 Resumo de correlações empíricas propostas para estimar a condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT a base de óleo.

Autor	Nanofluido	Correlação proposta	Aplicabilidade e acurácia
(FAKOOR PAKDAMAN et al., 2012)	MWCNT/ÓLEO	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 304,47(1 + \phi)^{136,35} \exp(-0,021T) \left(\frac{1}{d_p}\right)^{0,369} \left(\frac{T^{1,2321}}{10^{\frac{2,4642B}{T-C}}}\right)$	As constantes B e C são 247,8 e 140, respectivamente. Aplicabilidade: T=40 a 70 ° e $\phi = 0,1$ a 0,4 wt.%. Acurácia: Erro máximo: 6 %.
(ASADI et al., 2016)	MWCNT-MgO/ÓLEO	$k_{nf} = 0,162 + 0,691\phi + 0,00051T$	Aplicabilidade: T=25 a 50 °C e $\phi = 0,25$ a 2 vol.%. Acurácia: Erro máximo de 3 %.
(ILYAS et al., 2017b)	MWCNT/ÓLEO	$k_{nf} = 0,595 - 0,4547(1 - \phi) + T \left[0,7422 - 0,606(1 - \phi) + \frac{0,2759}{(1-\phi)} - \frac{0,3943}{(1-\phi)^2}\right]$	Aplicabilidade: T=25 a 63,15 °C e $\phi = 0,1$ a 1 wt. %. Acurácia: Erro máximo 3,5 % e $R^2 = 0,95$
(ASADI et al., 2018a)	MWCNT- Al_2O_3 /ÓLEO	$k_{nf} = 0,1534 + 1,1193\phi + 0,00026T$	Aplicabilidade: T=25 a 50 °C e $\phi = 0,125$ a 1,5 vol. %. Acurácia: Erro máximo 2 %.
(ASADI et al., 2018b)	MWCNT- Mg(OH)2/ÓLEO	$k_{nf} = 0,159 + 1,1112\phi + 0,003T$	Aplicabilidade: T=25 a 60 °C e $\phi = 0,25$ a 2 vol.%. Acurácia: Erro máximo 2 %.

Fonte: Autor

2.6.1.5 Medição da condutividade térmica de nanofluidos

Na literatura especializada encontram-se diversas experiências realizadas para medir a condutividade térmica de nanofluidos. No entanto, os resultados encontrados em diferentes pesquisas e as inconsistências apresentadas na medida experimental de condutividade térmica são associadas ao método de medição utilizado, além das diferentes técnicas de dispersão de nanopartículas (CARDENAS CONTRERAS, 2017).

Existem dois principais tipos de técnicas para medir as condutividades térmicas: de estado transiente e estacionário. Em geral, as técnicas de estado estacionário são úteis quando a temperatura do material não muda com o tempo. A desvantagem é que uma configuração experimental complexa é necessária. As técnicas transitórias realizam uma medição durante o processo de aquecimento. Sua principal vantagem é a realização de medições em curtos períodos de tempo.

Na Fig. 2.15 pode ser observado de forma geral, as técnicas mais comumente utilizadas na medição de condutividade térmica de nanofluidos.

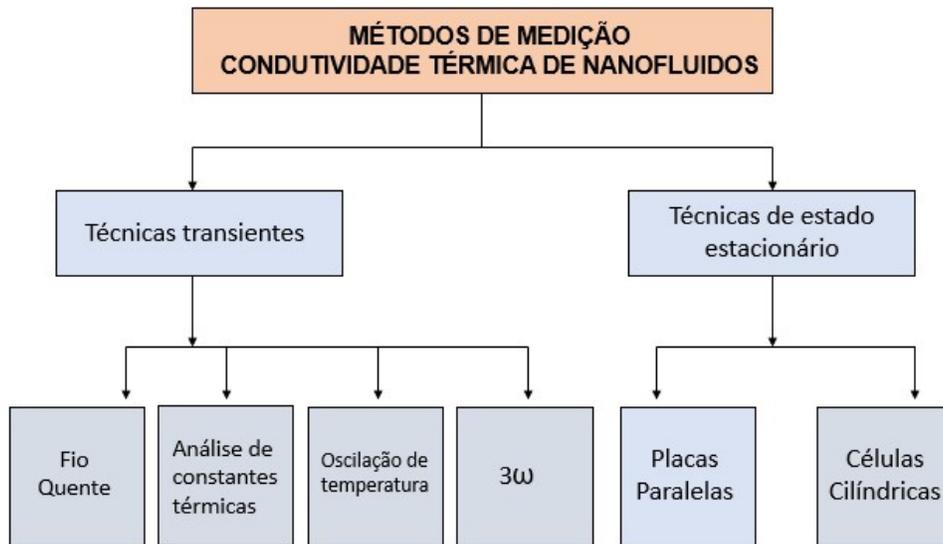


Figura 2.15 - Técnicas de medição de condutividade térmica para nanofluidos

Fonte: adaptado de (CARDENAS CONTRERAS, 2017)

Existem várias vantagens no uso do método do fio quente transiente, sendo a mais importante, a sua capacidade para eliminar experimentalmente o erro para aplicação em fluidos devido à convecção natural. Além disso, esta técnica é muito rápida em comparação com outros métodos e o desenho do aparelho é também simples em

comparação com as disposições necessárias para outras técnicas. Em geral, este método de medição tem aumentado sua popularidade de uso devido ao fato de que a condutividade térmica do líquido pode ser calculada diretamente com resultados confiáveis de repetitividade e precisão (BASHIRNEZHAD et al., 2015).

Ainda em relação ao método de fio quente transitório (THW) é a técnica experimental mais amplamente utilizada para medir a condutividade térmica de fluidos, por ser um método fácil e de baixo custo a ser implementado. É uma técnica dinâmica transiente padrão baseada na medição do aumento de temperatura em uma distância definida de uma fonte de calor linear (fio quente) colocado no material de teste. Um fio quente é colocado no fluido, que funciona como uma fonte de calor e um termômetro. O modelo matemático ideal do método é baseado na lei de Fourier, assumindo-se que o fio quente é uma fonte de calor ideal, infinita, fina e longa em um ambiente infinito de material homogêneo e isotrópico com temperatura inicial constante. De acordo com a Lei de Fourier, quando o fio é aquecido, o fluido de maior condutividade térmica corresponde a um aumento de temperatura mais baixo.

Xuan e Li (2000) aplicando o método de fio quente, mediram a condutividade térmica de nanofluidos de Cu/Óleo e Cu/Água. Este último para concentrações volumétrica de nanopartículas de 2,5 % e 7,5 %, apresentaram incrementos na condutividade térmica de 24 % e 78 %, respectivamente.

2.6.2 Viscosidade de nanofluidos

A viscosidade de um fluido de transferência de calor é importante no que diz respeito ao estudo de sua transferência de calor convectiva e potência de bombeamento necessária para aplicações práticas.

Os parâmetros de influência na viscosidade de nanofluidos que têm sido estudados até hoje pela comunidade científica especializada na área de nanofluidos, incluem concentração de nanopartículas, morfologia de nanopartículas, temperatura e taxa de cisalhamento, como pode ser observado na Fig.2.16 baseado no estudo realizado por Gupta et al., (2017).



Figura 2.16 - Fatores que influenciam na viscosidade de nanofluidos

Fonte: Adaptado de Gupta et al., (2017)

Dessa maneira, sabe-se que a concentração sólida de nanopartículas é um fator que têm um certo efeito no comportamento da viscosidade dos nanofluidos. A literatura mostra que a adição de nanopartículas aos fluidos a base, mesmo em uma concentração muito baixa, leva ao aumento da viscosidade dinâmica dos nanofluidos. No entanto, existem alguns relatos contraditórios. A principal causa desse aumento seria que a possibilidade de crescimento do cluster de nanopartículas aumenta à medida que a concentração de sólidos aumenta GUPTA et al., (2017).

Ettefaghi et al., (2013) investigaram a viscosidade de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em óleo de motor (20W50) em temperaturas de 40 e 100 °C e três concentrações 0,1, 0,2 e 0,5 wt.%. Os pesquisadores declararam que na baixa concentração de sólidos (0,1 wt. %), os nanotubos adicionados seriam colocados entre as camadas de óleo, o que permite a facilitar o movimento das camadas de óleo e assim, diminuindo a viscosidade do nanofluido. No entanto, em concentrações mais altas (0,2 e 0,5 wt. %), os nanotubos começam se aglomerar, o que acarreta ao aumento da viscosidade. Os autores também demonstraram que o aumento da temperatura propicia à diminuição da viscosidade. Conforme afirmam, a diminuição máxima foi de 0,25 %, o que ocorreu à temperatura de 100 °C e à concentração sólida de 0,1 wt. %,

enquanto o aumento máximo foi de 1,7 %, o que ocorreu à temperatura de 40 °C e à concentração sólida de 0,5 wt.%.

Saeedinia et al., (2012) investigaram experimentalmente a viscosidade de nanofluidos de CuO/Óleo. Os resultados experimentais de viscosidade dinâmica foram apresentados para diferentes concentrações de nanopartículas (0,2-2 wt.%) e diferentes temperaturas. Esses pesquisadores constataram um aumento significativo na viscosidade com o incremento da concentração de nanopartículas. Além disso, declararam que os maiores aumentos na viscosidade foram observados na menor temperatura.

Outro dos fatores importantes na viscosidade dos nanofluidos é a temperatura. Diferentes estudos mostram que a viscosidade dinâmica diminui à medida que a temperatura aumenta. A principal causa dessa diminuição seria atribuída ao fato de que as interações entre as moléculas de fluido diminuam à medida que a temperatura aumenta (ASADI et al., 2019).

Os efeitos da variação de temperatura e concentração sólida sobre a viscosidade dinâmica de MWCNT-MgO/Óleo de motor (SAE50) têm sido estudados por Asadi et al., (2016). Segundo os autores houve um aumento de 65 % na viscosidade dinâmica com a maior concentração de 2 vol.%. Além disso, foi observado que o máximo incremento na viscosidade ocorreu à temperatura de 40 °C. Também relataram que o aumento mínimo na viscosidade dinâmica foi de 14,4 %, o que ocorreu na concentração sólida de 0,25 vol.% e a temperatura de 25 °C.

Beheshti et al., (2014) determinaram experimentalmente a viscosidade dinâmica de nanofluidos de MWCNT/Óleo em distintas concentrações (0,001 – 0,010 wt.%) e temperaturas (20 °C – 40 °C). Eles observaram que a tensão de cisalhamento aumentou linearmente com o aumento da taxa de cisalhamento em todas as amostras testadas apresentando características de fluidos Newtonianos. No entanto, foi observado que a viscosidade dos nanofluidos foi menor em relação ao fluido base.

Baseados na revisão bibliográfica realizada sobre viscosidade dinâmica de nanofluidos foi observado que os fatores mais influentes na viscosidade dinâmica estudados por distintos pesquisadores são: A concentração de nanopartículas, temperatura, taxa de cisalhamento e morfologia das nanoestruturas. No entanto, os

resultados são controversos e esses fatores continuam sendo objeto de pesquisa e discussão.

2.6.2.1 Modelos analíticos utilizados para a previsão de viscosidade de nanofluidos

Existem alguns modelos clássicos para prever a viscosidade das suspensões. Nesta seção, são apresentados os modelos clássicos mais relevantes usados em estudos sobre nanofluidos a base de óleo. Sem dúvida, o modelo de Einstein (1906) é o modelo mais popular que pode ser mobilizado para prever a viscosidade das suspensões que contêm partículas esféricas. Apresenta-se o modelo de Einstein pela Eq. 2.11.

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi) \quad (2.11)$$

O modelo de Einstein foi estendido por Brinkman (1952) para prever a viscosidade das suspensões menos diluídas, conforme a Eq. (2.12)

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 - \phi)^{-2,5} \quad (2.12)$$

Considerando as interações entre partículas (movimento Browniano) em suspensão. Batchelor (1977) modificou o modelo de Einstein, conforme apresentado na Eq. 2.13.

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2) \quad (2.13)$$

Nesse sentido, existem diferentes modelos clássicos empregados na literatura para prever a viscosidade de nanofluidos. A Tab. 2.3, apresenta um resumo de modelos clássicos para prever a viscosidade de suspensões para diferentes partículas. Embora muitos pesquisadores tenham tentado propor um modelo para prever a viscosidade de diferentes nanofluidos, existem apenas alguns modelos para prever a viscosidade de nanofluidos dentro da faixa aceitável de precisão até o momento. Portanto, os pesquisadores propuseram diferentes correlações para prever a viscosidade de nanofluidos específicos em diferentes concentrações, temperaturas estudadas. Um resumo de modelos propostos para estimar a viscosidade de diferentes nanofluidos a base de óleo é apresentado na Tab. 2.4.

Tabela 2.3 Resumo de modelos clássicos para prever a viscosidade de diferentes suspensões

Referência	Modelo	Destaques
Einstein (1906)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi)$	Adequado para suspensões com partículas esféricas nas concentrações menores que 1 %
Brinkman (1952)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}(1 - \phi)^{-2,5}$	Aplicável para suspensões diluídas de partículas
Krieger e Dougherty (1959)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}\left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2,5}$	O modelo é capaz de prever a viscosidade de suspensões contendo esféricas rígidas e todas as concentrações
Nielsen (1970)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}(1 + 1,5\phi)e^{\left(\frac{\phi}{1-\phi_m}\right)}$	Este modelo de lei de potência é uma equação geral aplicável para materiais compostos
Jeffrey e Acrivos (1976)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}\left(3 + \frac{4}{3}\left(\frac{\phi r^2}{\ln\left(\frac{\pi}{\phi}\right)}\right)\right)$	O modelo é proposto para prever a viscosidade de suspensões não diluídas que contêm partículas tipo haste
Wang et al., (1999)	$\mu_{ef} = \mu_{fb}(1 + 7,3\phi + 123\phi^2)$	O modelo prevê a viscosidade dinâmica de diferentes nanofluidos

Fonte: Autor

Tabela 2.4 Resumo de correlações propostas para estimar a viscosidade dinâmica de nanofluidos a base de óleo

Referência	Nanofluidos estudados	Correlação proposta	Aplicabilidade e precisão
Pakdaman et al., (2012)	MWCNT-Óleo térmico	$\frac{\nu_{nf} - \nu_{fb}}{\nu_{fb}} = (-11,23T + 5926,5)\phi^{1,43}$	Para temperaturas entre 40 e 100 °C e concentrações de 0.1, 0.2 e 0.4 wt. % R=0,91
Dardan et al., (2016)	Al ₂ O ₃ -MWCNT/Óleo de motor (SAE40)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = 1.123 + 0.3251\phi - 0.08994T + 0.002552T^2 - 0.00002386T^3 + 0.9695\left(\frac{T}{\phi}\right)^{0.01719}$	Nas temperaturas de 25 a 50 °C e concentração 0,0625 a 1 vol.%; erro máximo de 2 %
Asadi et al., (2016)	MgO-MWCNT/Óleo de motor (SAE50)	$\mu_{nf} = 328201 \times T^{-2.053} \times \phi^{0.09359}$	Para temperatura de 25 a 50 °C e concentração de 0,25 a 2 vol.%; Erro máximo de 8 %
Hemmat Esfe et al., (2016)	MWCNT-SiO ₂ /Óleo de motor (SAE40)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + a_3\phi^3$	Os valores de a seriam encontrados no artigo em diferentes temperaturas variando de 25 a 50 °C e concentrações variando de 0,0625 a 2 vol.%
Hemmat Esfe et al., (2017)	MWCNT-ZnO/Óleo de motor (SAE40)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = A + B\phi + C\phi^2 + D\phi^2$	Os valores A, B, C e D são encontrados em diferentes artigos a diferentes temperaturas na faixa de 25 a 60 °C e concentração de 0.05 a 1 vol.%

Fonte: Autor

2.6.2.2 Medição da viscosidade de nanofluidos

Apresenta-se a seguir, os tipos de equipamentos utilizados para a medição da viscosidade de nanofluidos encontrados na literatura:

- Viscosímetro tipo pistão: trata-se de um pistão metálico que se move dentro de uma câmara preenchida com o fluido, sob a influência de um campo magnético oscilante. O período de oscilação do pistão é proporcional à viscosidade, para uma dada intensidade de campo. A temperatura do fluido se mantém constante durante a medição (MOTTA,2012).
- Viscosímetro rotacional: A viscosidade é determinada por meio da velocidade angular de uma parte móvel separada de uma parte fixa pelo líquido. Pode apresentar duas geometrias, cone-placa e placa-placa. Na primeira, a parte fixa é, geralmente, a parede do recipiente em que está o líquido. Na segunda, a parte móvel pode apresentar o formato de palhetas ou cilindro. O cone gira sobre o líquido entre ele e uma placa fixa (MOTTA,2012).
- Viscosímetro capilar: é derivado de sistemas dedicados a medição de queda de pressão em microcanais. A taxa de cisalhamento na parede do microcanal é medida diretamente através de queda de pressão e a taxa de cisalhamento na parede é medida através da taxa de fluxo (CHEVALIER,2007).

2.6.3 Calor específico

A capacidade de calor específico, é um parâmetro para mostrar a capacidade de um fluido armazenar e remover o calor da fonte quente, é uma das propriedades mais importantes que tem um efeito direto sobre o desempenho da transferência de calor dos nanofluidos (ASADI et al., 2019b).

No trabalho realizado por Bergman (2009), assim como no de Lee e Mudawar (2007), enfatiza-se que, quando nanopartículas são adicionadas ao fluido base, além de outras propriedades, o calor específico do nanofluido resultante também é afetado e, tipicamente, o mesmo é menor do que o do fluido base.

Existem dois modelos disponíveis comumente empregados na literatura para prever o calor específico de nanofluidos, eles são baseados na regra da mistura entre as partículas e o fluido circundante. O primeiro modelo para a determinação do calor específico $C_{p,nf}$ das amostras de nanofluidos foi proposto por Pak e Cho (1998). Este

modelo considera a concentração volumétrica das nanopartículas, ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão ($c_{p,fb}$ e $c_{p,np}$) como é apresentado na Eq. 2.14.

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,fb} + \phi c_{p,np} \quad (2.14)$$

No entanto, a Eq. 2.14 é aproximadamente correta somente para dispersões onde a diferença existente entre a massa específica da nanopartícula e do fluido base é pequena. O segundo modelo utilizado foi apresentado por Xuan e Roetzel (2000). Esse segundo modelo é baseado no pressuposto do equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante, a partir do qual, ao aplicar a primeira lei da termodinâmica origina-se o modelo matemático para o cálculo do calor específico do nanofluido ($c_{p,nf}$) conforme a Eq. 2.15.

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_{fb} + \phi(\rho c_p)_{np}}{(1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}} \quad (2.15)$$

Onde ρ_{fb} é a massa específica do fluido base, ρ_p é a massa específica da nanopartícula.

2.6.4 Massa específica

A massa específica dos nanofluidos geralmente é determinada por intermédio do modelo matemático compatível com a regra da mistura (CARDENAS, 2019). Isto é, o cálculo de massa específica de soluções pode ser realizado a partir de regras de mistura, que são utilizadas para prever propriedades de misturas a partir das propriedades de componentes puros (HOFFMAN, 2014).

Pak e Cho (1999) mediram a massa específica de nanofluidos de dióxido de titânio e de alumina a base de água com concentração de nanopartículas de 31,6 %. Os autores relataram um desvio máximo de 0,6 % em relação aos resultados calculados pela teoria da regra da mistura e a medição realizada.

Uma vez que a concentração em volume de nanopartículas ϕ é determinada na dispersão, a massa específica da dispersão pode ser calculada a partir da Eq. 2.16.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_p \quad (2.16)$$

Vajjha et al., (2009) realizaram medições de massa específica em três nanofluidos de diferentes nanopartículas no mesmo fluido base. As medições de massa específica foram realizadas em uma faixa de temperatura de 0 °C a 50 °C para varias concentrações de volume de partículas de até 10 %. Os resultados experimentais mostraram uma boa concordancia com a equação teórica com desvios máximos de 1,18%.

Kedzierski (2013) relatou uma boa concordancia dos resultados aferidos em relação à massa específica de nanofluidos a base de óleo com os resultados calculados a partir da regra da mistura. Os desvios apresentados pelos resultados experimentais não foram superiores que 1 % quando comparados com o modelo teórico.

2.7 Transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos

O regime laminar é muito importante para o entendimento dos fenômenos físicos em relação a outros regimes de fluxo, porque em fluxo laminar totalmente desenvolvido cada partícula se move ao longo da linha de fluxo e o perfil de velocidade permanece inalterado. Este movimento altamente ordenado do fluido é conhecido como fluxo laminar. No caso de escoamento no interior de tubos, o fluxo é considerado laminar para até $Re < 2300$. Se o tubo for longo o suficiente, após a região de entrada o fluxo é considerado totalmente desenvolvido e os efeitos de entrada são desprezíveis.

O conhecimento do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos é fundamental na determinação da utilidade prática dos nanofluidos nos sistemas térmicos. Por tanto, para fomentar as perspectivas de utilização de nanofluidos em processos térmicos com maior eficiência energética é necessário o profundo conhecimento do comportamento desse parâmetro.

Wen e Ding (2004) investigaram a transferência de calor laminar na região de entrada usando nanofluidos de Al_2O_3 /água em diferentes concentrações de nanopartículas. De acordo com seus resultados experimentais, o coeficiente de transferência de calor na região de entrada na posição axial $x/D=63$ e em $Re=1050$, apresentaram aumentos de 41 % e 47 %, respetivamente, quando comparados com a água. Os autores ressaltam que o aumento é particularmente significativo na região de entrada e diminui com a distância axial. Além disso, relataram que o comprimento de

desenvolvimento térmico dos nanofluidos é maior do que o do fluido base, e aumenta com o incremento da concentração de nanopartículas.

Rea et al., (2009) estudaram experimentalmente a transferência de calor de nanofluidos de Zircônia/água e Al_2O_3 /água em escoamento laminar, os coeficientes de transferência de calor na região de entrada e na região desenvolvida, aumentaram 17 % e 27 %, respectivamente para os nanofluidos de Al_2O_3 /água. A análise local do coeficiente foi realizada em função da posição axial. Foi percebido que a maior transferência de calor aconteceu na entrada da seção de teste e decresce com a distância axial. Os nanofluidos com nanopartículas de Zircônia não mostraram incrementos significativos.

Asirvatham et al., (2011) analisaram a transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos. Os autores realizaram experimentos usando nanofluidos de Ag/água em condições de regime laminar, região de transição e regime turbulento num tubo horizontal. O calor transferido na seção de teste foi realizado num trocador de calor de tubo duplo em contracorrente. As concentrações em volume utilizadas foram 0,3 %, 0,6 % 0,9 %. Os experimentos demonstraram que a dispersão de nanopartículas de prata incrementou notavelmente o coeficiente de transferência de calor, como por exemplo, um acréscimo de 28,9 % para $\phi=0,3$ % e até 69,3 % para $\phi = 0,9$ %.

Garg et al., (2009) investigaram experimentalmente a transferência de calor convectiva laminar de nanofluidos de MWCNT/água na concentração de 1 wt.%. O maior aumento na transferência de calor convectiva foi de 32 %. O aumento na transferência de calor convectiva foi encontrado com o incremento da distância axial. O aumento percentual no coeficiente de transferência de calor em uma distância axial específica diminuiu ligeiramente com o aumento do número de Reynolds.

Amrollahi et al., (2010) realizaram experimentos na região de entrada do escoamento onde ocorre o desenvolvimento da camada limite térmica, utilizando nanofluidos de MWCNT/água em escoamento laminar com fluxo de calor constante. O máximo aumento relatado foi de 33 % para a maior concentração de nanotubos e à temperatura de 20 °C. O critério de comparação utilizado foi o mesmo número de Reynolds.

Kumaresan et al., (2013) mostraram uma intensificação de 150 % e 92 % do coeficiente de transferência de calor em $x/D=93,46$ para nanofluidos de MWCNT/H₂O-

EG (70:30) cujas concentrações volumétricas de nanopartículas foram de 0,45 % e 0,15 %. Uma possível explicação, para a intensificação da transferência de calor por convecção é que o movimento dos nanotubos de carbono dentro do fluido base perturba o rápido desenvolvimento da camada limite térmica.

Huang et al., (2015) avaliaram experimentalmente a transferência de calor e a queda de pressão de nanofluidos de Al_2O_3 /água e MWCNT/água escoando em um trocador de calor de placas paralelas com concentrações em volume inferiores de 2,84 % de Al_2O_3 e 0,055 % de MWCNT. Os autores relataram pouco aumento no coeficiente de transferência de calor quando foi comparado sob a mesma velocidade.

As pesquisas mencionadas anteriormente envolvem estudos de transferência de calor de nanofluidos utilizando como fluido base: água, etilenoglicol, ou misturas desses fluidos. Um resumo dos trabalhos experimentais sobre nanofluidos a base de água e etilenoglicol pode ser observado na Tab. 2.5.

Por outro lado, baseados na revisão bibliográfica realizada, foi constatado que existe um número reduzido de trabalhos experimentais sobre transferência de calor de nanofluidos com óleo como fluido base. Esses trabalhos, são estudados principalmente dentro de um regime de escoamento laminar, o qual pode dever-se à alta viscosidade desses fluidos. A seguir serão revisados os trabalhos experimentais referentes à transferência de calor de nanofluidos a base de óleo.

Razi et al., (2011) investigaram experimentalmente o coeficiente médio transferência de calor de nanofluidos de CuO/Óleo escoando no interior de um tubo horizontal sobre a condição de fluxo de calor constante. O estudo tinha como objetivo avaliar o efeito da seção transversal, fluxo de calor, concentração de nanopartículas e número de Reynolds. Os resultados relatados mostraram que a configuração de tubos achatados propiciou maiores aumentos no coeficiente de transferência de calor quando comparados com os apresentados para tubos de seção transversal circular. Os autores relataram um aumento do coeficiente médio de transferência de calor com o incremento da concentração de nanotubos de carbono. O aumento máximo no coeficiente de transferência de calor foi de 26,4% para uma concentração de 2 wt.%. Ainda segundo Razi et al., (2011), os aumentos obtidos na condutividade térmica incrementariam o coeficiente de transferência de calor convectivo. Além disso, relataram que o movimento caótico das partículas sólidas em fluxo perturba a formação da camada

limite térmica na superfície de parede do tubo. Como resultado dessa perturbação, o desenvolvimento da camada limite é atrasado. Uma vez que coeficientes de transferência de calor mais elevados de fluxo de fluido em um tubo são obtidos na região de entrada térmica, o atraso na formação da camada limite térmica resultante da adição de nanopartículas aumentará o coeficiente médio de transferência de calor. Os autores, por fim, afirmaram que os maiores incrementos no coeficiente médio foram obtidos para a maior concentração de nanopartículas.

Akhavan et al., (2012) realizaram uma investigação experimental sobre a transferência de calor de nanofluidos com nanopartículas de diamante dispersas em óleo na condição de fluxo de calor uniforme. Observaram que a taxa de transferência de calor dos nanofluidos aumentou em até 55% em relação ao fluido base com o aumento da concentração sólida de nanopartículas e número de Reynolds.

Saeedinia et al., (2012) investigaram experimentalmente a transferência de calor de nanofluidos de CuO a base de óleo escoando dentro de tubo horizontal em regime laminar e completamente desenvolvido hidrodinamicamente. Os resultados demonstraram que o maior aumento do coeficiente de transferência de calor (12,7 %) comparado com o fluido base, foi observado com a maior concentração sólida (2 wt.%) e o maior número de Reynolds (120).

Pirhayati et al., (2014) estudaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluidos sob fluxo de calor constante para regime laminar e hidrodinamicamente desenvolvido. Para realizar o experimento, prepararam o nanofluido de CuO/Óleo em diferentes concentrações mássicas. Eles consideraram os impactos de vários parâmetros, como inclinação do tubo (0°, 30° e 60°), a concentração de mássica (0.5 %, 1 % e 2 % wt.) e o número de Reynolds (20 – 140) no coeficiente de transferência de calor por convecção. Eles observaram que o coeficiente de transferência de calor do nanofluido geralmente aumentava com o aumento do número de Reynolds dentro dos tubos horizontais e inclinados.

Amiri et al., (2015) investigaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluidos de nanotubos de carbono em óleo de turbina (OT-32) escoando dentro de tubo circular horizontal em regime laminar ($Re : 350 - 750$). Eles prepararam nanofluidos estáveis em diferentes concentrações (0,001 %, 0,01 %, 0,05 % e 0,1 % vol.). De acordo com os resultados apresentados, com o incremento da concentração sólida de nanotubos de carbono, aumentou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção em todas as posições axiais ao longo do tubo.

Hekmatipour et al., (2016) analisaram a transferência de calor por convecção em nanofluidos de CuO a base de óleo térmico em regime laminar. Os pesquisadores apresentaram um incremento significativo do coeficiente de transferência de calor com o aumento da concentração de nanopartículas. Os incrementos observados foram na ordem de 22% para uma concentração mássica de nanopartículas de 1,5 %.

Cárdenas (2019) apresentou resultados experimentais sobre o desempenho da transferência de calor por convecção de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo em regime de escoamento laminar no interior de um tubo horizontal sob a condição de contorno de fluxo de calor constante na superfície externa do tubo. O nanofluido de maior concentração mostrou o incremento máximo (7,6 %) no coeficiente de transferência de calor.

Apesar de que os mecanismos responsáveis por estes aprimoramentos da transferência de calor ainda não serem compreendidos, diferentes autores da área sugeriram que movimento browniano das nanopartículas dever ser considerado. No entanto, este assunto continua sendo um objeto de discussão na comunidade científica, e os principais motivos apontados para tanto são: forma, tamanho, razão de aspecto e alinhamento das nanopartículas, redução da espessura da camada limite, aumento na condutividade térmica e formação de estruturas de percolação, entre outros.

A revisão da literatura em convecção forçada em nanofluidos a base de óleo demonstra ainda a escassez de trabalhos nessa linha, apesar do significativo aumento no número de publicações nos últimos anos. Além disso, é perceptível a necessidade de preencher lacunas na literatura especializada no que diz respeito à análise do comportamento de diferentes nanofluidos em escoamentos laminares, e de confrontar modelos e resultados experimentais, tendo em vista a aparente falta de unanimidade na concordância desses dois enfoques. Nesse contexto, explora-se a contribuição deste trabalho, por meio do qual busca-se aumentar o número de publicações referentes a transferência de calor por convecção forçada interna de nanofluidos a base de óleo em escoamento laminar, e ajudar a determinar a utilidade prática desse tipo de fluidos em aplicações nos sistemas térmicos.

Tabela 2.5 Trabalhos experimentais sobre a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar - água e/ou etilenoglicol(continua)

Autor(es)	Nanofluidos	Concentração	Condições	Destques
(DING et al., 2006)	MWCNT/água	0,25 – 0,5 vol. %	Fluxo de calor constante, + h=350 %, Re=800. Q=300 W; Re= 800 – 1200; Em desenvolvimento térmico	Eles declararam que os aumentos dependiam das condições de fluxo, concentração de nanotubos de carbono e pH. Realizaram análise local do coeficiente h.
(GARG et al., 2009)	MWCNT/água	1 wt. %	Fluxo de calor constante Q=600 W; Re=600-1200; Região de entrada térmica;	+h=32 %, Re=600. Verificou-se que o aumento percentual no coeficiente de transferência de calor aumenta com incremento da distância axial.
(AMROLLAHI et al., 2010)	FMWCNT/água	0,1 – 0,25 wt. %	Temperatura entrada = 20 e 33°C; Re=1592	+h=33 % na máxima concentração de nanotubos de carbono e T=20 °C
(ASIRVATHA M et al., 2011)	Ag/água	0,3 %, 0,6 % e 0,9 vol. %	Re=900-12000 Temperatura entrada = 48,57 °C	+h=28,9 %; mesmo Re. +h=69,3 %; mesmo Re Relataram aumento do coeficiente com o incremento do Re.

Fonte: Autor

Tabela. 2.5 Trabalhos experimentais sobre a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar - água e/ou etilenoglicol (conclusão)

Autor(es)	Nanofluidos	Concentração	Condições	Destaques
(KUMARESAN et al., 2013)	MWCNT/água	0,15 – 0,45 vol.%	$\dot{m}=0,40 – 0,80$ kg/s Temperatura de entrada = 0-40	+92% h_{local} , $\phi = 0,15$ %; mesmo Re; 150 % h_{local} , $\phi=0,45$ %; mesmo Re.
(HUANG et al., 2015)	AL ₂ O ₃ /água, MWCNT/água	2 0,056 – 2,84 vol.%	Temperatura entrada= Re=40-600	-7,5% do h, para $\phi=2,84$ % -15,5% do h, para $\phi=0,055$ % Mesma velocidade
(AKHAVAN-ZANJANI et al., 2016)	Grafeno/água	0,005 – 0,020 vol.%	Temperatura entrada = 25-35 °C Validação Eq. Shah	+14,2 h, $\phi=0,020$ %, mesmo Re
(CARDENAS, 2019)	Ag/água-EG	0,005-0,050 vol.%	Fluxo de calor constante $T_{ent}=15-25$ °C Re=	+14 % do h, para mesmo Re.

Fonte: Autor

Tabela 2.6 Trabalhos experimentais sobre transferência de calor de nanofluidos a base de óleo (continua)

Autor(es)	Nanofluidos	Concentração	Condições	Destaques
(RAZI et al., 2011)	CuO/Óleo	0,2 %, 0,5 %, 1 %, 2 wt. %	Fluxo de calor constante, $q''=2600 \text{ kW}$; $Re=10-120$; Em desenvolvimento térmico. $L=1,20 \text{ m}$	+ $h=26 \%$, para $\phi = 2 \text{ wt. } \%$. Eles relataram um aumento na transferência de calor com o incremento da concentração de nanopartículas
(AMIRI et al., 2015)	MWCNT/Óleo	0,001 – 0,1 vol. %	Fluxo de calor constante; $Re=350-750$; Região de entrada térmica; Validação: Seider e Tate (1936)	+ $h=50 \%$, para $\phi = 0,1 \text{ vol. } \%$ Aumento do coeficiente de calor com incremento do número de Reynolds e concentração de nanotubos de carbono.
(SAEEDINIA et al., 2012a)	CuO/Óleo	0,2 – 2 wt. %	Fluxo de calor constante, $q''=9900 \text{ W/m}^2$; $Re=10-120$; $L=1,20 \text{ m}$	+ $h=12,7 \%$ na máxima concentração de nanotubos de carbono e Re .
(PIRHAYATI et al., 2014)	CuO/Óleo	0,5 – 2 wt. %	Fluxo de calor constante; $Re=20 - 170$; $L=1,20 \text{ m}$.	+ $h=15,2 \%$; mesmo Re . Relataram aumento do coeficiente com o incremento da concentração de nanopartículas e o Re .

Fonte: Autor

Tabela 2.6 Trabalhos experimentais sobre transferência de calor de nanofluidos a base de óleo (conclusão)

Autor(es)	Nanofluidos	Concentração	Condições	Destaques
(JAFARIMOGHADDAM et al., 2017)	CuO/Óleo	0,011-0,171 vol.%	Fluxo de calor constante; Re=20-140	+h 16,3 %, mesmo Re; concentração de 0,0171 vol.%
(HEKMATIPOUR et al., 2016)	CuO/Óleo	0,5 – 1,5 vol.%	Temperatura de parede constante; Tubo horizontal;	+ 22 % do Nu; $\phi=1,5$ %; mesmo Re.
(CARDENAS, 2019)	MWNCT/Óleo Ag/Óleo	0,005-0,050 vol.%	Fluxo de calor constante; Re=60-90; L=2,64 m; $T_{ent}=45$ °C; Validação: Seider & Tate (1936).	+h 13,3 %, com o maior Re e a maior concentração de CNT; +h 2,7 %, com o maior Re e a maior concentração de Ag.
Presente trabalho	MWCNT/Óleo	0,0019-0,005 vol.%	Fluxo de calor constante; Re=60-160 L=2,64 m $T_{ent}=55 - 65$ °C	+h 10,14 %, mesmo Re, CNT; +h 7,08 %, mesmo Re, CNT+AO; Análise local ao longo da região de entrada

Fonte: Autor

2.8 Queda de pressão e fator de atrito em escoamento interno de nanofluidos

Quando é analisada a transferência de calor por convecção interna forçada, seja em escoamento laminar ou escoamento turbulento, os efeitos viscosos são intensificados devido ao contato do fluido com as paredes, a rugosidade das superfícies e a interação entre as moléculas e partículas. Nesse sentido, os comportamentos fluidodinâmicos dos nanofluidos são também escopo de pesquisas que avaliam o desempenho termo hidráulico (CARDENAS, 2019).

A primeira pesquisa que pode ser mencionada sobre a queda de pressão para escoamento interno em tubos foi realizada por (XUAN; LI, 2003). Os autores afirmaram que além de considerar características de intensificação de troca térmica é necessário saber sobre a resistência ao escoamento de nanofluidos. Os pesquisadores determinaram o fator de atrito (f) para nanofluidos de CuO/água com concentração em volume de 1 %, 1,2 % e 1,5 % e foi observado que o fator de atrito das três amostras foi praticamente igual ao fluido base. Nos experimentos não foi observado incremento significativo da queda de pressão que ocasionasse uma penalidade extra na potência de bombeamento. Este comportamento implicaria que o fator de atrito dos nanofluidos poder ser determinado por intermédio de uma correlação clássica para escoamento monofásico.

Lee et al., (2007) relataram em seu trabalho experimental as características sobre o escoamento de duas dispersões aquosas de nanotubos de carbono. Em uma dispersão foi adicionado em tensoativo para manter a estabilidade e, na outra dispersão, empregaram-se nanotubos de carbono contendo grupos funcionais oxigenados na superfície do nanotubo, que foram criados pelo tratamento ácido. Baseados nos resultados obtidos, os autores afirmaram que sob condições de escoamento laminar o fator de atrito do nanofluido estabilizado pela adição de surfactante foi muito maior do que o nanofluido preparado pelo tratamento com ácido. As duas amostras apresentaram também um fator de atrito maior do que o fluido base (água destilada). No entanto, em regime turbulento o fator de atrito para as duas amostras tornou-se muito semelhantes ao do fluido base.

Hwang et al., (2009) investigaram a queda de pressão de nanofluidos de Al_2O_3 escoando no interior de tubos horizontais com a condição de fluxo de calor uniforme. Os resultados experimentais apresentaram relevância com a equação de Darcy. Além disso, foi observado um decréscimo do fator de atrito com o incremento do número de Reynolds.

Razi et al., (2011) estudaram a queda de pressão ao longo de um tubo para escoamento de óleo puro e nanofluidos de CuO a base de óleo com diferentes concentrações sólidas de nanopartículas. Conforme afirmaram os pesquisadores, houve um aumento da queda de pressão com o aumento da concentração sólida de partículas. O máximo incremento foi de 12 % e foi registrado para a concentração sólida maior (2 wt. %). Além disso, a variação da queda de pressão versus o número de Reynolds também foi investigada. Eles relataram que a queda de pressão dos nanofluidos e o fluido base aumenta com o incremento do número de Reynolds. Este comportamento também foi observado por outros autores como (LIU; YU, 2018) (LEE; MUDAWAR, 2007).

Recentemente, (CARDENAS, 2019) investigo experimentalmente a queda de pressão e o fator de atrito de nanofluidos de MWCNT/Óleo, os resultados obtidos apresentaram uma diminuição da queda de pressão com a adição de nanopartículas, destacando um decréscimo de 6,6 % quando comparado com o fluido base.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

Para atingir o objetivo geral proposto neste trabalho, que consiste em avaliar experimentalmente a transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos a base de óleo no interior de um tubo horizontal, foram executadas previamente uma série de etapas que são apresentadas neste capítulo.

A primeira seção do capítulo descreve a seleção do método de preparação, materiais, equipamentos e a rotina de procedimentos utilizados no processo de síntese dos nanofluidos. A segunda seção evidencia os processos de caracterização dos nanofluidos e os métodos empregados para medir e calcular suas propriedades termofísicas também são apresentados (condutividade térmica, viscosidade, massa específica e calor específico). A terceira seção, apresenta os métodos empregados na avaliação da estabilidade dos nanofluidos. A quarta seção, descreve a bancada experimental e as modificações realizadas para atingir as condições de teste desejadas. A última seção apresenta a validação da bancada experimental para determinar o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão dos nanofluidos.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Energia, Sistemas térmicos e Nanotecnologia (LEST-nano), localizado na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

3.2 Síntese dos nanofluidos

Um dos maiores desafios da pesquisa com nanofluidos é alcançar a estabilidade deles a longo prazo, pois isto depende principalmente dos métodos utilizados na preparação. Para a síntese dos nanofluidos analisados no presente trabalho foi adotado o método de dois passos. Os nanofluidos produzidos foram, então, divididos em dois grupos:

- i) nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo sem revestimento superficial de nanopartículas (CNT);
- ii) nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo com revestimento superficial de nanopartículas com ácido oleico (CNT+AO).

Os nanofluidos foram preparados no laboratório de química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Foram utilizadas distintas técnicas de preparação observadas na literatura da área de nanofluidos. A seguir são apresentados as principais informações sobre o processo de produção dos nanofluidos neste trabalho.

3.2.1 Materiais

As nanopartículas (MWCNT) utilizadas na produção dos nanofluidos são adquiridas em forma de pó de uma solução funcionalizada de alta concentração em massa de nanopartículas, fornecidas pela empresa NanoAmor (Nanostructured & Amorphous Materials, Inc), cujas características são apresentadas na Tab.3.1. O fluido base utilizado foi o óleo mineral LUBRAX-OT100 fornecido pela PETROBRAS, cujas características e propriedades são apresentadas no APÊNDICE III. As informações técnicas do ácido oleico empregado para o tratamento superficial de nanopartículas são fornecidas pela DINÂMICA e apresentadas no APÊNDICE IV.

Tabela 3.1 Características das nanopartículas utilizadas na produção dos nanofluidos

Nanopartículas	MWCNT
Nome dado	CNT
Morfologia	Nanotubo
d (nm)	20-30
L (µm)	10-30
ρ_{np} (g/cm³)	2,1
$C_{p,np}$ (kJ/kg K)	0,71

Fonte: Nanostructured & Amorphous Materials, Inc

3.2.2 Equipamentos utilizados na preparação de nanofluido

A seguir são apresentados os principais equipamentos utilizados durante a etapa da preparação dos nanofluidos a base de óleo.

3.2.2.1 Processador ultrassônico

Foi empregado um processador ultrassônico programável da marca Qsonica, modelo Q500 que possui uma frequência de trabalho de 20 kHz e permite a seleção da potência de trabalho de até 500 W, em pulsos ajustáveis e prolongados tempos de sonicação. O equipamento utilizado pode ser observado na Fig.3.1.



Figura 3.1 Processador ultrassónico Q500SONICA utilizado no processo de homogeneização dos nanofluidos; (a) Controlador e (b) sonda ultrassom

Fonte: Autor

3.2.2.2 Centrífuga

O revestimento com ácido oleico, é um procedimento que requer a separação das fases (sólida e líquida), uma vez que a adsorção física de espécies na superfície é induzida. Com base nisso, um aparelho centrifugador foi utilizado neste trabalho a fim de separar as substâncias. O equipamento empregado neste trabalho pode ser visto na Fig.3.2.



Figura 3.2 Centrífuga UNIVERSAL 320R, utilizada no processo de preparação de nanofluidos de CNT+AO

Fonte: Autor

3.2.3 Tratamento superficial de nanopartículas

A síntese de nanofluidos homogêneos e estáveis é um dos maiores desafios encontrados por pesquisadores na área dos nanofluidos. Com a finalidade de melhorar a estabilidade da dispersão de nanotubos de carbono no óleo, uma técnica de tratamento superficial pelo revestimento com ácido oleico das nanopartículas tem sido adotada neste trabalho para um grupo de nanofluidos produzidos (CNT+AO). Os procedimentos realizados foram baseados na metodologia de tratamento superficial realizada por (OLIVEIRA, 2018) e pode ser visto na Fig.2.8.

A técnica de tratamento superficial das nanopartículas (MWCNT) pela adição de ácido oleico incluiu aplicação de técnicas mecânicas de dispersão como a ultrassônica (Q500, 150 W, 2h) para a quebra dos aglomerados e dispersão das nanopartículas no ácido oleico, assim como a centrifugação (320R, 4h, 8000 RPM) para a separação das fases sólida e líquida.

Na Fig. 3.3 (a) é apresentada a suspensão de nanotubos de carbono em ácido oleico após o processo de ultrassom, e na Fig. 3.3 (b) pode ser observada a separação das fases após o processo de centrifugação. Posteriormente, a fase líquida é drenada eliminando o excesso de ácido oleico, resultando na quantidade de surfactante mínima necessária para cobrir totalmente a área superficial dos nanotubos.



Figura 3.3 Processos de modificação superficial dos nanotubos de carbono; (a) dispersão em ácido oleico e (b) após o processo de centrifugação

3.2.4 Preparação dos nanofluidos (MWCNT)

A produção dos dois grupos de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo foi realizada de acordo com uma rotina de procedimentos estabelecidos. Um diagrama esquemático do processo de produção dos nanofluidos pode ser visto na Fig.3.5. no item seguinte.

3.2.4.1 Descrição das etapas de preparação

A síntese dos nanofluidos foi baseada no método de dois passos. O método abrange a dispersão de nanopartículas (MWCNT) em óleo mineral (OT100) variando a concentração de 0,0019 % a 0,005 % em volume nas faixas de temperatura na preparação de 25 °C até 65 °C. Foram produzidos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo sem tratamento superficial de nanopartículas (CNT) e com tratamento superficial de nanopartículas (CNT+AO). As concentrações em volume e massa desejadas das nanopartículas são determinadas usando as equações 2.1 e 2.3 e podem ser observadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Descrição das amostras de nanofluidos produzidos a base de óleo

Nome da amostra	Nanopartícula/diâmetro	Fluido base	[% vol.] Φ	[%] wt.
CNT_1	MWCNT/20-30	OT100	0,0019	0,005
CNT_2	MWCNT/20-30	OT100	0,0038	0,010
CNT_3	MWCNT/20-30	OT100	0,0050	0,015
CNT+AO_1	MWCNT/20-30	OT100	0,0019	0,005
CNT+AO_2	MWCNT/20-30	OT100	0,0038	0,010
CNT+AO_3	MWCNT/20-30	OT100	0,0050	0,015

Fonte: Autor

Nesta primeira etapa, são determinadas as quantidades de nanopartículas para cada uma das concentrações sólidas de interesse e realizada a medição e separação das massas necessárias de fluido base (OT100) e das nanopartículas (MWCNT) que obedecem às concentrações previamente estabelecidas. Este processo é verificado com auxílio de uma balança digital, por meio da qual a massa das nanopartículas secas é conferida.

Devido à elevada viscosidade do óleo térmico, primeiramente é utilizado o agitador de turbina para facilitar a dispersão das partículas dentro do fluido base durante 20 minutos. Uma vez finalizado o processo de agitação mecânica, as amostras são submetidas a um processo ultrassônico do tipo banho, para o qual foi utilizado um banho ultrassom de baixa potência (50 W) durante 2 horas. Desse processo é observado a quebra das aglomerações e a dispersão das partículas homogeneamente. Posteriormente, cada amostra é sonicada utilizando-se um processador ultrassônico programável, aplicando uma potência de 400 W (80 %) com frequência de 20 kHz com pulsos em ON de 5s e tempo em OFF de 8s durante 2 horas. O processador ultrassônico gera calor durante a operação, porque toda a energia é dispersa no fluido, o que ocasiona um aumento da temperatura do fluido. Em seguida, um banho de água de resfriamento é usado para dissipar o calor dos nanofluidos durante a homogeneização ultrassônica. A temperatura dos nanofluidos durante o processo manteve-se a 30 °C. Finalmente é observada uma completa dispersão das nanopartículas no óleo base.

No total foram produzidos 6 nanofluidos a base de óleo. Três nanofluidos de nanotubos de carbono (CNT), e, três nanofluidos de nanotubos de carbono com tratamento superficial com ácido oleico. No final do processo foram separadas as amostras de 200 ml de cada nanofluido produzido para os ensaios de propriedades termofísicas e quantificação da estabilidade coloidal, como pode ser observado na Fig. 3.4.

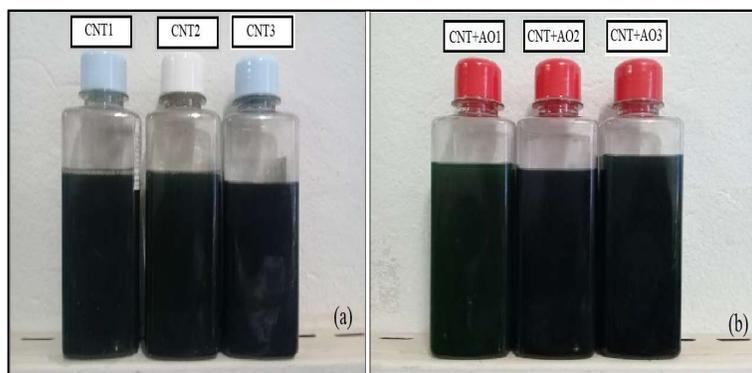
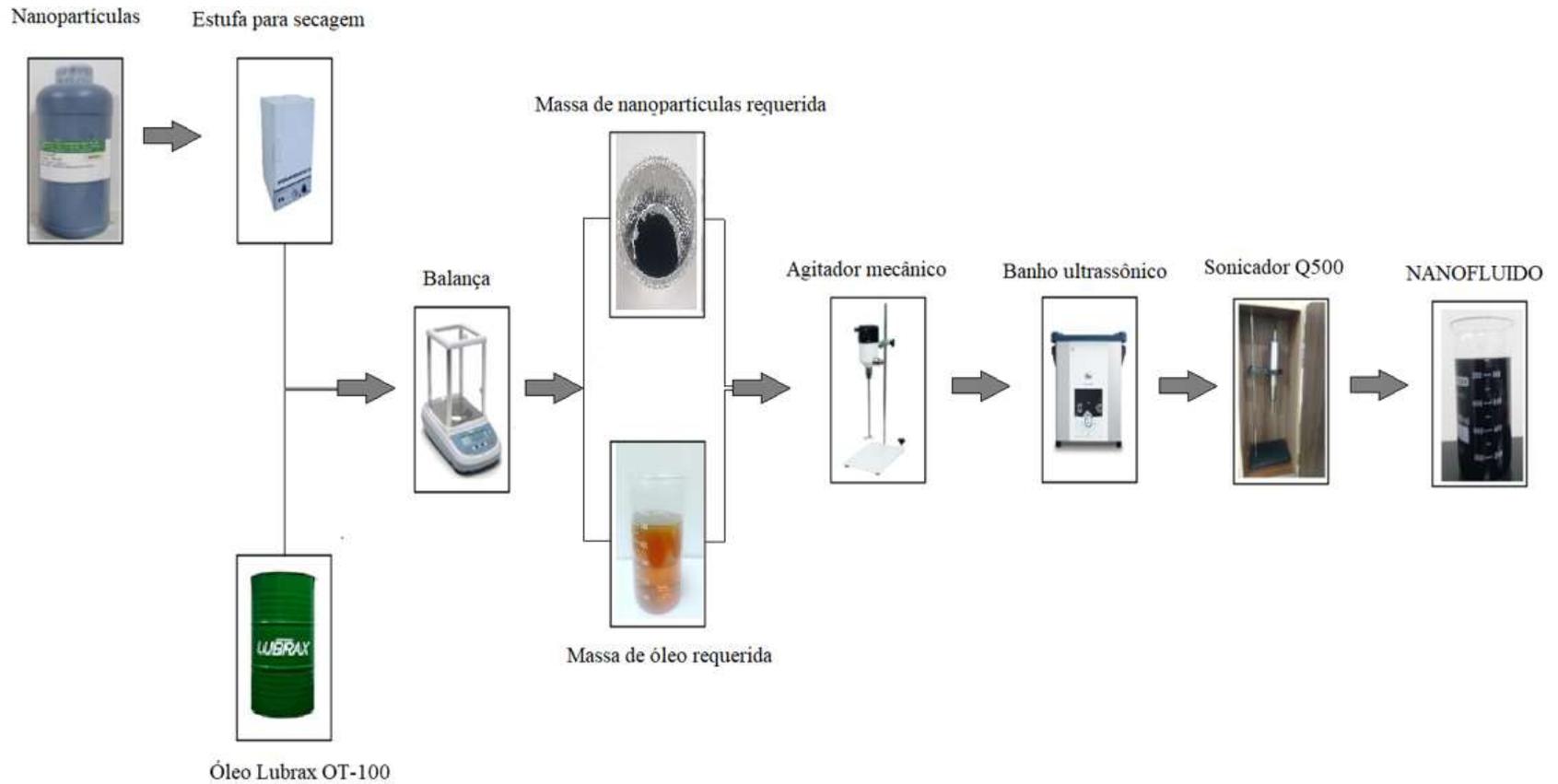


Figura 3.4 Fotos das amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo produzidos (a) nanopartículas sem tratamento superficial; (b) com tratamento superficial.

Figura 3.5 Processo de produção de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo



3.3 Caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos

3.3.1 Massa específica e viscosidade

A massa específica e a viscosidade dinâmica foram medidas utilizando um viscosímetro rotacional, modelo Stabinger SVM 3000 da Anton-Paar, o qual pode ser visto na Fig. 3.6. Esse equipamento realiza simultaneamente medições de viscosidade dinâmica e massa específica, assim como o cálculo da viscosidade cinemática de acordo com a norma ASTM D7042. O princípio físico para determinar a viscosidade é baseado no escoamento entre placas planas paralelas e infinitas.

Além disso, graças a sua tecnologia Peltier empregada para equilíbrio térmico não é necessário a utilização de banhos externos com circulação de líquido, controlando assim a temperatura da amostra, permitindo realizar medições desde 10 °C até 105 °C com precisão de 0,2 °C e estabilidade de até 0,005 °C.



Figura 3.6 - Viscosímetro Stabinger SVM 3000 utilizado para as medições de massa específica e viscosidade de fluidos

A célula de medição compõe-se de dois tubos concêntricos, o tubo externo gira com uma velocidade constante dentro de uma carcaça de cobre com temperatura controlada. O cilindro interno possui uma massa específica menor que as amostras testadas. Por tanto, baixa massa específica permite que o cilindro interno flutue livremente dentro da amostra e seja centrado pela força centrífuga. A tensão de cisalhamento do fluido em rotação induz a rotação do rotor interno. Entretanto, uma

corrente induzida pela carcaça de cobre age em um ímã giratório localizado dentro do rotor interno, produzindo um torque de freio que controla a velocidade do rotor. Assim a velocidade constante é atingida pelo equilíbrio entre o efeito de frenagem da corrente induzida e entre as forças de cisalhamento da amostra. A viscosidade dinâmica é calculada por intermédio da velocidade do rotor e das forças de cisalhamento da amostra. Na Fig. 3.7 é ilustrado um esquema da célula de medição de viscosidade dinâmica do equipamento. Além disso, o equipamento também possui uma célula de medição da massa específica que opera de acordo com o princípio de oscilação do tubo em “U”.

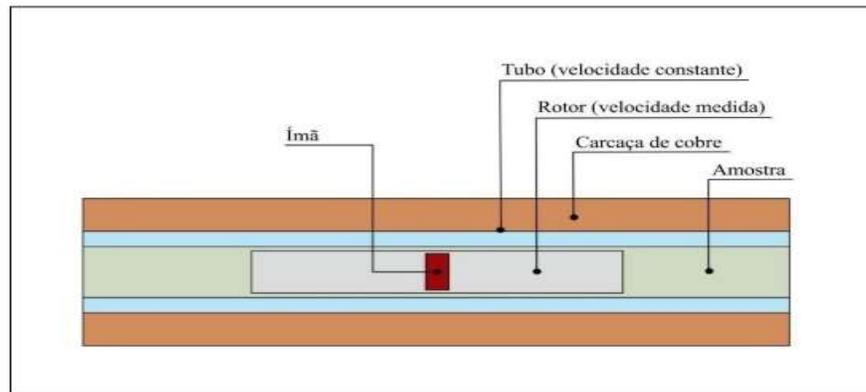


Figura 3.7 - Esquema da célula de medição do viscosímetro SVM3000

O procedimento experimental de medição destas propriedades precisa de uma pequena quantidade de amostra (~2,5 ml). Ambas as células (da viscosidade e da massa específica) são preenchidas na mesma operação, desse modo as medições são realizadas simultaneamente. É importante destacar que uma vez que os nanofluidos foram preparados, a viscosidade e massa específica foram determinadas logo em sequência.

Com o intuito de avaliar o efeito da concentração de nanotubos de carbono e da temperatura na massa específica e viscosidade dos nanofluidos a base de óleo, os fluidos foram testados desde 20 °C até 100 °C em incrementos de 10 °C. Nesse sentido, foram realizadas 6 medições para cada condição de temperatura. Por tanto, os valores apresentados de viscosidade dinâmica e da massa específica para cada valor de temperatura são resultado de uma média aritmética das 6 medições realizadas. As

incertezas das medições de viscosidade, massa específica e temperatura informadas pelo fabricante são apresentadas na Tab. 3.3.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza de medição
Viscosidade dinâmica	0,2 a 20.000 [mPa.s]	±0,35%
Massa específica	0,65 a 3 [g/cm ³]	±0,0005 g/cm ³
Temperatura	-56 a 105 [°C]	±0,02 °C

Tabela 3.3 - Incerteza de medição das medições no equipamento SVM3000

Fonte: Fabricante

3.3.2 Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido a base de óleo foi determinado mediante a aplicação de um modelo baseado no equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante, tal modelo matemático é dado pela Eq. 2.15 para o cálculo do calor específico do nanofluido $c_{p,nf}$, que parte da aplicação da primeira lei da termodinâmica e que considera a concentração volumétrica partículas sólidas ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão ($\rho_{fb} c_{p,fb}$) e ($\rho_{nf} c_{p,nf}$). Além disso, destaca-se que a massa específica do fluido base é obtida a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, os quais são apresentados no Apêndice III. As propriedades físicas dos nanotubos de carbono, calor específico, massa específica, foram obtidas pelos dados fornecidas pela Nanostructured & Amorphous Material Inc, conforme exposto no Apêndice II.

3.3.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é medida com auxílio de um analisador de propriedades térmicas da Linseis (THB1- Transient Hot Bridge). O método THB ou método transiente de ponte quente, é utilizado para a determinação da condutividade térmica de sólidos e líquidos. Este método é uma evolução do método transiente de fio quente (THW) que segue a diretriz da norma (DIN EN 993-14, DIN EN 993-15). O equipamento e a sonda de medição são mostrados na Fig. 3.8.

Este equipamento possui um fundo de escala de até 1 W/m K e incerteza menor que 3% do valor medido. O método THB utiliza a sonda que emite um fluxo de calor constante durante um intervalo de tempo e adquire simultaneamente os valores da temperatura do material ou fluido. Portanto, a condutividade térmica é estabelecida em função da relação de temperatura-tempo e das características geométricas da sonda, sob a hipótese de que a sonda é uma fonte de calor pontual que está imersa em um meio homogêneo e isotrópico.



Figura 3.8 Condutivimetro Linseis e vistas aproximadas do sensor THB

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2018)

A condutividade térmica do fluido base e dos nanofluidos foi medida para avaliar os efeitos da concentração sobre esta propriedade. O efeito da temperatura foi avaliado por meio de uma cuba, projetada para manter constante a temperatura de uma amostra de ~5 ml. É importante ressaltar que a cuba representa um trocador de calor, pois é acoplado a um banho termostático, permitindo controlar e manter a temperatura da amostra constante durante a medição. O banho termostático utilizado foi MQBMP-01 da Microquímica Equipamentos Ltda., com capacidade de controlar a temperatura de 0 até 90 °C, com precisão de 0,1 °C e estabilidade de até 0,02 °C.

A condutividade térmica dos nanofluidos foi medida em temperaturas de 20 °C até 60 °C, em incrementos de 10 °C. Foram realizadas 30 medições para cada

concentração e cada temperatura, e a média aritmética dos valores obtidos foi assumida como valor da medição, garantindo a repetitividade e diminuindo o erro aleatório. A Fig 3.9 apresenta de forma esquemática a montagem experimental utilizada para a medição da condutividade térmica a diferentes temperaturas.

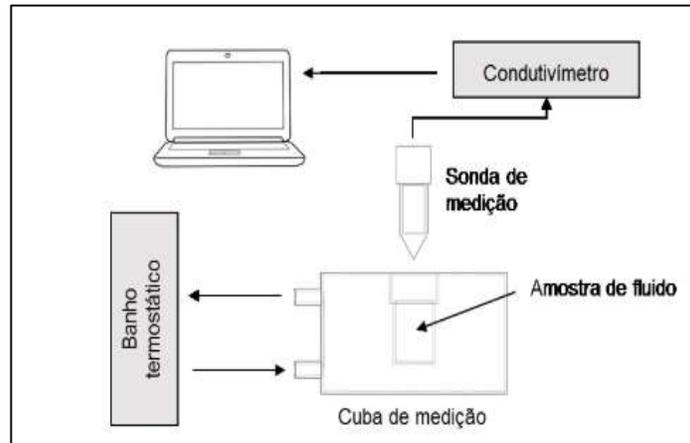


Figura 3.9 Esquema dos componentes do processo de medição de condutividade térmica de nanofluidos

Fonte: Adaptado de (MARCUCCI, 2018)

3.4 Análise de estabilidade dos nanofluidos

A estabilidade de nanofluidos é um dos grandes desafios na busca de aplicações desses fluidos em sistemas térmicos. Como foi afirmado no capítulo de revisão bibliográfica, embora tenham sido abordados diversos estudos que apresentaram incrementos significativos na condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor de nanofluidos quando comparados com seus fluidos base, a estabilidade coloidal de uma grande quantidade desses estudos sobre nanofluidos tem se mostrado comprometida ao longo do tempo, apresentando distintos fenômenos envolvidos e prejudicando as propriedades termofísicas dos nanofluidos, e portanto, limitando seu potencial de aplicação.

Com o propósito de analisar o comportamento da dispersão dos nanotubos de carbono (CNT e CNT+AO) no fluido base (OT100) em termos de estabilidade, nesta seção serão descritos os métodos para análise da estabilidade coloidal dos nanofluidos

produzidos neste trabalho. Foram utilizados dois métodos com diferentes abordagens, qualitativa (inspeção visual) e quantitativa (UV-VIS). A análise de inspeção visual da estabilidade pode ser corroborada quantitativamente através do método de espectrofotometria UV-Visível. Os dois métodos utilizados neste trabalho são abordados e explicados de maneira detalhada, separadamente, a seguir.

3.5.1 Análise de inspeção visual

Conforme informado anteriormente, no capítulo de revisão bibliográfica, o método de análise por inspeção visual é um dos métodos mais comumente encontrados na literatura especializada, principalmente devido à praticidade com que o método pode ser aplicado, tendo em conta que é necessário somente uma câmera e a observação humana para realizar uma análise qualitativa da estabilidade. Neste trabalho, após o processo da preparação pelo método de dois passos, é separada uma quantidade de 5 ml de cada um dos nanofluidos produzidos e colocada em recipientes hermeticamente fechados e armazenados em superfície lisa à temperatura ambiente para serem monitorados periodicamente por inspeção visual e espectroscopia UV-VIS. As fotos foram registradas no mesmo dia dos ensaios de análise UV-Vis. Este método é realizado com auxílio de uma câmera digital, onde o monitoramento visual foi realizado mediante fotos das amostras de nanofluidos com a sua evolução temporal. As imagens foram obtidas no dia da preparação, e após 1, 2 e 3 meses.

3.5.2. Análise por espectrofotometria UV-VIS

A análise por espectrofotometria UV-VIS foi realizada com auxílio do espectrofotômetro UV-1900 da SHIMADZU, equipamento mostrado na Fig 3.10. O princípio empregado pelo equipamento para a determinação da concentração sólida de partículas em suspensão é descrito pela Lei de Lambert-Beer, a qual afirma que a absorvância é diretamente proporcional à concentração em peso da solução (MUKHERJEE, 2013).

Na espectrofotometria UV-VIS, o valor de pico inicial representa a maior fração de peso de nanopartículas com base nos espectros de absorção devido às propriedades ópticas das nanopartículas e sua morfologia de superfície, como tamanho e forma. Um dos principais benefícios desse método é que ele pode ser aplicado a todos os tipos de fluidos básicos usados na síntese de nanofluidos (REHMAN et al., 2019a). Primeiramente, usando-se uma amostra de concentração alta, faz-se o registro do

espectro na faixa inteira do visível, desde 450 até 700 nm. No espectro é determinado onde os comprimentos de onda λ em que a absorbância fica máxima. Todas as medições a seguir da concentração sólida de partículas são feitas neste λ fixo, pois aqui o método adotado tem a maior sensibilidade e mostra a maior linearidade. Na sequência, a etapa de calibração é feita, considerando-se que ela se compõe de medidas das soluções padrões. Para essa medição, um valor de absorbância é obtido no comprimento de onda λ fixo estabelecido. Finalmente, a absorbância da amostra pode ser transformada em sua concentração usando a relação linear $A \sim \phi$ elucidada na etapa da calibração. Nesse procedimento foi variado o comprimento de onda λ de 480 até 700 nm e determinadas as concentrações para cada um dos dias de teste. Dessa forma foi possível verificar a quantidade de concentração sólida em suspensão ao longo do tempo. Os procedimentos de operativos do equipamento experimental podem ser conferidos no apêndice II.



Figura 3.10 Espectrofotômetro UV-1900 do laboratório LESTnano

Fonte: Autor

3.5 Bancada experimental

Com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e hidráulico dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo produzidos neste trabalho, foram realizadas algumas modificações no equipamento experimental existente para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção e a queda de pressão do fluido

escoando em regime laminar no interior de tubo circular reto e horizontal sob a condição de contorno de fluxo uniforme de calor na superfície.

O aparato experimental empregado para este caso de estudo é apresentado esquematicamente na Fig.3.11. Este, consiste principalmente de uma seção de testes, o sistema de resfriamento, o sistema de pré-aquecimento, o sistema de escoamento e medição de vazão mássica e o sistema de monitoramento e aquisição de dados. Cada um dos sistemas é apresentado com detalhe a seguir.

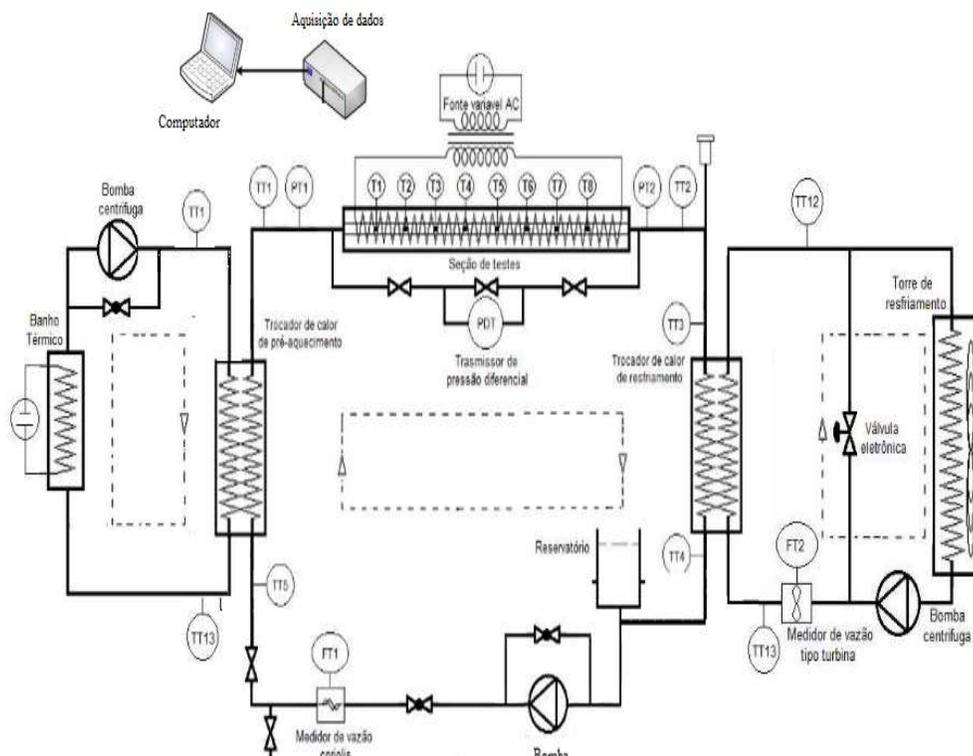


Figura 3.11 Diagrama esquemático da bancada experimental

Fonte: Autor

3.5.1 Seção de testes

A seção de testes está constituída de um tubo circular horizontal de latão de interior liso, com diâmetro interno de 6,35 mm, diâmetro externo de 12,7 mm e espessura de parede de 3,175 mm e um comprimento total de 2480 mm.

A análise térmica na seção de teste é realizada empregando a equação da energia para escoamento permanente de um fluido em um tubo liso, que pode ser expressa como

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{ent} - T_{sai}) \quad (3.1)$$

Onde, T_{ent} e T_{sai} , são as temperaturas médias do fluido na entrada e na saída da seção de teste, respetivamente, e \dot{Q} representa a taxa de transferência de calor para o fluido. A condição de fluxo de calor constante na superfície é realizada quando o tubo é submetido ao aquecimento da resistência elétrica uniformemente. O fluxo de calor na superfície é expresso como

$$q'' = h(T_{P(x)} - T_{m(x)}) \quad (3.2)$$

Considerando a equação, $T_{P(x)}$ representa a temperatura de parede registrada por termopares tipo T e PT100, colocados na superfície do tubo ao longo da seção de teste. Dessa maneira, sendo a condição de contorno de fluxo de calor constante, o parâmetro requerido para a solução do problema, obtém-se finalmente o balanço de energia para o volume de controle descrito pela Eq. 3.3.

$$\dot{Q} = q'' A_s = \dot{m}c_p(T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (3.3)$$

Onde, A_s é a área interna do tubo da seção de teste.

Para medir as temperaturas de parede, a seção de teste possui 8 termopares tipo T (fornecidos pela OMEGA ENGINEERING, INC.), e 8 Sensores de temperatura RTD do tipo PT100, distribuídos em 8 pontos ao longo da parede externa do tubo. Destaca-se que cada um dos 8 pontos contém um termopar e um PT100 em posições diametralmente opostas. Assim, os instrumentos de medição de temperaturas encontram-se fixados em ranhuras confeccionadas no tubo em diferentes posições, a partir da entrada. As ranhuras possuem uma profundidade de 1,8 mm, uma largura de 3 mm e comprimento de 20 mm. Uma representação esquematizada das características geométricas na seção de testes pode ser observada na Fig.3.12. Esta representação esquematizada mostra as posições onde estão localizados os sensores de temperatura, assim como uma vista lateral e frontal de seção de testes.

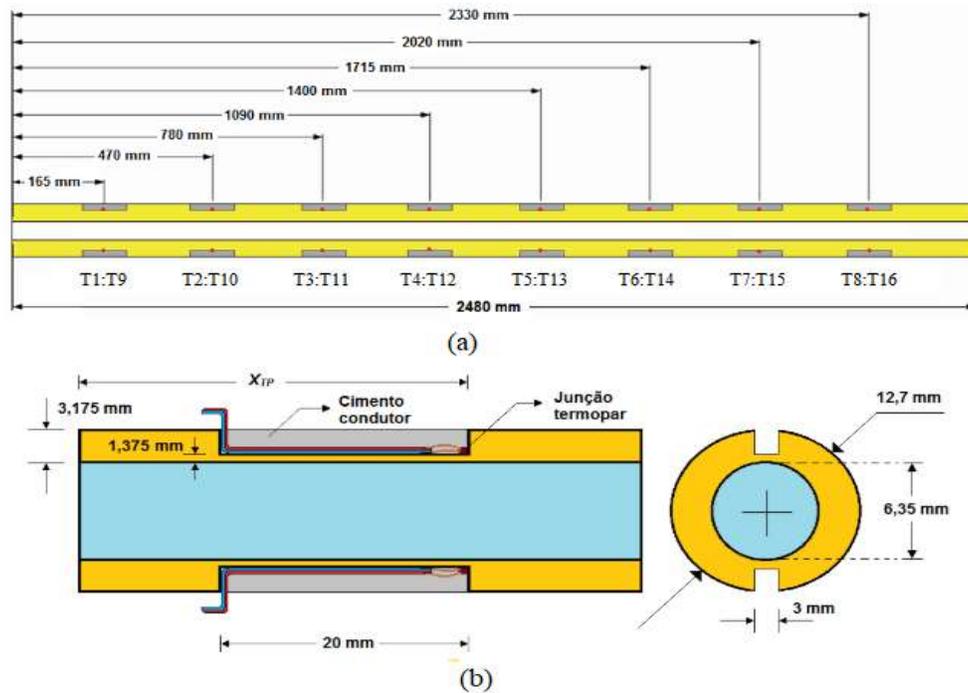


Figura 3.12 Representação esquematizada na instalação dos instrumentos de medição de temperatura. (a) posição dos sensores de temperatura na parede do tubo; (b) vista frontal e lateral de um segmento da seção de teste.

Fonte: Adaptada de Cárdenas (2019)

A condição de contorno de fluxo de calor constante aplicado à parede do tubo é proporcionada pelo aquecimento de 12 resistências elétricas do tipo fita flexível, isoladas com poliamida, modelo KH serie 115 Volts $10\text{W}/\text{m}^2$ – Flexible Heaters (Fornecidas por OMEGA ENGINEERING, INC). Essas fitas flexíveis encontram-se fixadas sobre toda a área externa do tubo da seção de teste com auxílio de fixa adesiva com poliamida (Kapton-DUPONT). A potência elétrica requerida para efetuar o aquecimento das fitas resistivas foi controlada por meio de um variador de tensão monofásico (Variac) de 10KVA e corrente máxima de 40A, modelo JNG-TDGC2 (fornecido por iTesT medição e automatização Ltda.)

3.5.2 Sistema de pré-aquecimento

O sistema de pré-aquecimento tem como objetivo controlar a temperatura na entrada da seção de testes. Logo após do fluido sair da seção de teste, é resfriado e perde calor na seção de escoamento e medição de vazão mássica. Em função disso, é

necessário aquecê-lo novamente antes de entrar na seção de testes. Esta etapa é realizada no circuito de pré-aquecimento, o qual é constituído de um reservatório de água com um volume de 100 L, uma bomba centrífuga (modelo ICS-50 BV fornecido pela Eletroplas), e um trocador de calor casco tubo.

A bomba centrífuga do sistema de pré-aquecimento fornece uma vazão máxima de 2,1 m³/h. A água é aquecida por uma resistência elétrica de 3,5 kW cuja potência é regulada por um conversor estático de potência (modelo TH6200A16 fornecido pela THERMA). Este sistema possui um controle PID de temperatura que age na temperatura de entrada da seção de teste, possibilitando uma precisão de $\pm 0,10$ °C do valor alvo de temperatura de “*set point*”. A água do reservatório transfere calor ao fluido de teste por intermédio de um trocador de casco e tubos. No interior do tubo escoam o fluido de teste e no casco escoam a água do reservatório em contracorrente. O calor transferido é monitorado através de 4 sensores de temperatura PT100 instalados na entrada e na saída do trocador de cada circuito.

É importante ressaltar que para atingir as temperaturas dos testes neste trabalho foi necessário realizar modificações na tubulação do sistema de pré-aquecimento, instalando uma tubulação de cobre em todo o circuito hidráulico de pré-aquecimento permitindo-se atingir temperaturas na água do reservatório até de 90 °C.

3.5.3 Sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento da bancada experimental tem como objetivo manter as condições de operação, removendo o calor recebido pelos nanofluidos na seção de teste por intermédio de um trocador de calor. No entanto, considerando-se que o presente trabalho visa em testar o óleo em temperaturas altas, o sistema de resfriamento foi objeto de modificações para atingir o objetivo proposto. Para isso, foi projetado e construído um trocador de calor de casco e tubos (5 passes) água-óleo. Um modelo 3D e características geométricas do trocador de calor pode ser visto na Fig.3.13.

O sistema de resfriamento consta do trocador de calor de 1 passe no casco e 5 passes nos tubos, uma bomba hidráulica e uma torre de resfriamento. Os tubos têm paredes finas de cobre, e no interior dos tubos escoam o fluido de teste. Pelo casco escoam água por meio de uma bomba hidráulica (modelo B-12 WEG, fornecida pela Thebe

Bombas hidráulicas) com rotação de 3500 RPM e vazão máxima de $7\text{m}^3/\text{h}$. A vazão mássica é monitorada por um medidor de vazão roda d'água (da série SPX de efeito hall fornecido por Contech). O calor absorvido pela água durante o processo de resfriamento é rejeitado pela passagem na torre de resfriamento.

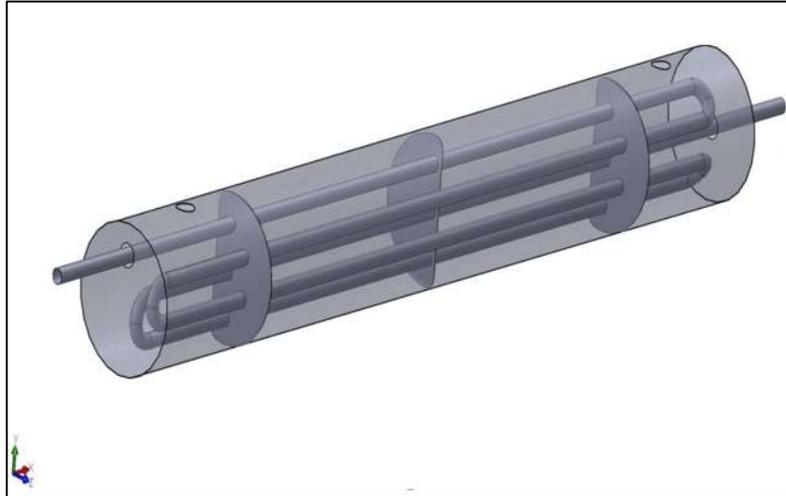


Figura 3.13 Modelagem 3D do trocador de calor projetado e construído

Fonte: Autor

3.5.4 Sistema de escoamento e medição de vazão mássica

O sistema de escoamento e medição de vazão mássica é constituído de uma bomba de engrenagens, duas válvulas eliminadoras de ar e um medidor de vazão do tipo Coriolis, como pode ser observado na Fig.3.14.

O equipamento responsável para manter o regime de escoamento do fluido no circuito principal é a bomba de engrenagens, a qual foi instalada na bancada experimental, se mostrando apropriada nas condições de operação realizadas. Duas válvulas eliminadoras de ar foram colocadas nos locais mais elevados para eliminar ou minimizar as bolhas no escoamento no interior do escoamento. Dessa maneira buscou-se diminuir efeitos indesejados nas variáveis de interesse. O medidor de vazão de Coriolis é responsável pela medição de vazão mássica. Ele é constituído por um conjunto sensor-transmissor. O sensor do tipo Coriolis, (modelo RHM06-4F1PS) e o

transmissor ou unidade eletrônica (modelo CMM01) foram fornecidos por METROVAL Ltda.

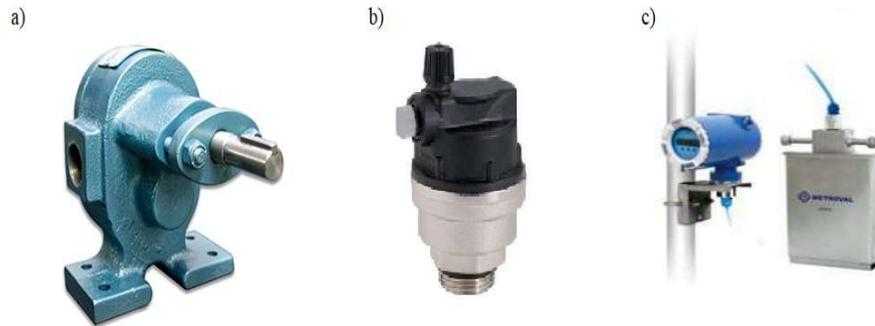


Figura 3.14 (a) Bomba de engrenagens; (b) Válvula eliminadora de ar; (c) Medidor de vazão de Coriolis

3.5.5 Sistema de monitoramento e aquisição de dados

O sistema de monitoramento e aquisição de dados é necessário na avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos. Tal sistema é desenvolvido no software LabView mediante uma interface homem-máquina que permite comunicação entre os equipamentos e o operador que está monitorando o processo. Desta maneira, a interface permite visualizar as informações fornecidas pelos instrumentos de medição instalados na bancada experimental, assim como também é possível ajustar parâmetros para atingir as condições requeridas em cada um dos testes. Nesse sentido, o sistema de monitoramento e aquisição de dados da bancada experimental está fundamentada na simbologia gráfica para visualização de processos (ISA-S5.5, 1986) (Graphic Symbols for Process Displays).

O sistema de monitoramento também permite manipular a potência na resistência do banho térmico localizado no sistema de pré-aquecimento, e assim atingir as condições específicas na temperatura de entrada para cada teste. O painel de monitoramento e controle pode ser observado na Fig.3.15.

O sistema de aquisição de dados consta de um computador com o software LabView instalado e dois chassis NIcDAQ-9178 CompactDAQ USB de 8 slots, projetado para sistemas de teste portáteis de médio porte que fazem medições de sinais

físicos e elétricos. O chassi NIcDAQ-9178 permite elaborar tarefas simultaneamente com até 8 módulos de entrada ou saídas analógicas e digitais como pode ser observado na Fig 3.16.

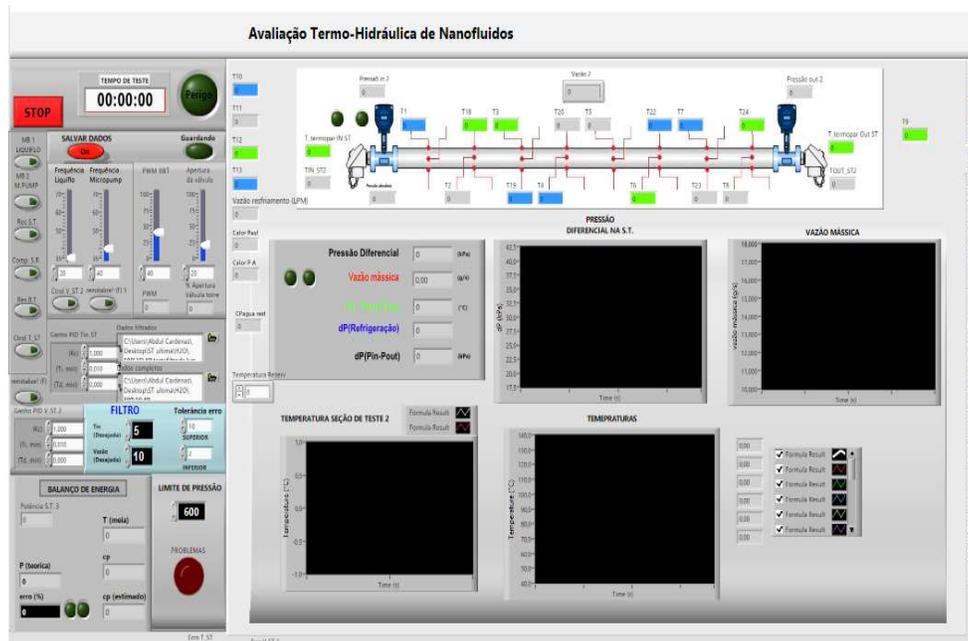


Figura 3.15 Interface gráfica em LabView

Fonte: Autor



Figura 3.16 Chassi nicdaq-9178 CompactDAQ USB utilizado no sistema de aquisição de dados

Fonte: <http://www.ni.com>

A placa de aquisição NIcDAQ-9178 transfere ao computador os sinais elétricos condicionados pelos módulos de aquisição. As leituras dos dados são visualizadas a cada 5 segundos, e esses dados são também armazenados em uma tabela de texto em formato “.txt” para seu processamento. Uma lista dos instrumentos e módulos utilizados para o

monitoramento das variáveis de interesse com o chassi NIcDAQ-9178 é exibida na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Módulos e instrumentos que compõem o sistema de monitoramento

Modulo	Número de Canais	Instrumento	Seção	Grandeza	Variáveis
NI9214	8	Termopar	Seção de testes	Temperatura	T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8
NI9216	8	PT100	Seção de testes	Temperatura	T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15
NI9216	2	PT100	Seção de Teste	Temperatura	Tent, Tsai
NI9216	2	PT100	Sistema de pré-aquecimento	Temperatura	TT1, TT13
NI9203	1	Medidor de vazão	Sistema de escoamento	Vazão mássica	FT1
NI9203	2	Transmissor de pressão	Seção de teste	Pressão	PT3, PT4
NI9203	1	Transmissor de pressão diferencial	Seção de teste	Pressão	PDT
NI9203	1	Inversor de frequência	Sistema de escoamento	Potência	PST1
NI9242	1	Varivolt S.T	Seção de teste	Tensão AC	VT1
NI9246	1	Varivolt S.T	Seção de teste	Corrente AC	CT1
NI9265	16	Controlador de potência	Sistema de pré-aquecimento	Potência	PC1

É importante ressaltar que a comunicação entre os instrumentos da bancada experimental e o computador é realizada por meio de dois painéis elétricos, um painel da aquisição de dados e outro painel de potência.

A Fig. 3.17 apresenta a bancada experimental na sua forma final, uma vez que foram realizadas todas as modificações necessárias para atingir as condições de operação desejadas para este trabalho.



Figura 3.17 Equipamento experimental final

Fonte: Autor

3.6 Análise e validação da bancada experimental

Uma vez que foram realizadas as modificações necessárias para atender às condições específicas de interesse deste trabalho, o passo seguinte foi implementar uma metodologia para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção e o fator de atrito. Nesse sentido, o procedimento experimental e a análise dos dados obtidos da bancada experimental foram inicialmente validados com etilenoglicol e óleo puro, cujas propriedades termofísicas são conhecidas. O propósito da validação é garantir que o equipamento experimental possa realizar, coerentemente e corretamente, todas as medições inicialmente para os fluidos base, e posteriormente para os nanofluidos.

O fluido de teste escoia pela ação da bomba de engrenagens instalada, passando primeiramente pelo medidor de vazão mássica e seguindo até o trocador de calor de casco e tubos do sistema de pré-aquecimento para o ajuste da temperatura de entrada do fluido segundo o requerimento do experimento. Dessa maneira o fluido sai do trocador para a entrada da seção de teste onde a temperatura de entrada do fluido é registrada. A partir desse ponto, o fluido escoia no interior do tubo da seção de teste, cuja parede é aquecida pela dissipação de calor imposta pelas resistências aderidas. Simultaneamente

são registradas as temperaturas da parede, em diferentes posições axiais a partir da seção de teste, a temperatura média do fluido na saída da seção de teste, assim como a diferença de pressão do fluido em escoamento com os dados referentes à pressão diferencial do fluido entre a entrada e saída. Após de passar na seção de teste, o fluido segue para o trocador de casco e tubos do sistema de resfriamento, onde o calor absorvido na seção de teste é rejeitado pelo fluido, reiniciando o ciclo.

O primeiro teste de funcionamento da bancada foi realizado utilizando um volume de 3000 ml. Embora se tenha buscado minimizar o volume interno de fluido necessário para os testes, esse volume aumentou 500 ml quando comparado com a bancada experimental antes das modificações realizadas.

O teste envolveu a variação de todos os parâmetros com vistas a se determinar a faixa de operação específica de cada ensaio, conforme se pode observar a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Condições de teste - Validação bancada experimental

Fluido	T_{entrada} [°C]	Q_{P.E} [W]	\dot{m} [g/s]
	55		7
Óleo (OT100)	60	400	12
	65		17
			100
Etilenoglicol Puro	40	400	110
			120

Fonte: Autor

Outros objetivos deste ensaio preliminar foram:

- i) verificar ausência de vazamentos;
- ii) testar a rotina de aplicação e retirada do fluido na bancada;

- iii) avaliar o funcionamento da válvula do by-pass;
- iv) verificar o funcionamento da bomba de engrenagens;
- v) verificar a resposta do sistema de controle de temperatura no sistema de preaquecimento;
- vi) verificar a resposta do sistema de resfriamento;
- vii) verificar o correto funcionamento da resistência elétrica responsável pelo fluxo de calor constante na seção de teste;
- viii) verificar os sistemas de controle e aquisição de dados.

3.6.1 Balanço de energia e isolamento da seção de testes

Com o intuito de validar se o balanço de energia foi atingido e verificar a perda de calor da seção de teste para o ambiente, foi realizada uma comparação que relaciona a potência elétrica fornecida pelas resistências elétricas, responsáveis pela condição de fluxo de calor constante ao longo da seção de teste $\dot{Q}_{P,E}$, com o calor transferido ao fluido de teste, resultante do cálculo do balanço de energia $\dot{Q}_{B,E}$. O Erro do balanço de energia em relação às medições da potência elétrica pode ser calculado pela Eq. 3.4.

$$EB = \left[\frac{\dot{Q}_{P,E} - \dot{Q}_{B,E}}{\dot{Q}_{P,E}} \right] * 100 \quad (3.4)$$

Onde, $\dot{Q}_{P,E}$, foi mantido na condição de 400W para os dois fluidos, como pode ser visto na Tabela 3.4. Na Fig.3.18 são apresentados os resultados experimentais para a comparação da potência elétrica e a potência calculada pelo balanço de energia dos ensaios preliminares para validação do balanço de energia.

Considerando essas informações, o desvio médio para o calor do balanço de energia comparado com o medido da potência elétrica foi de 7,06 % para os fluidos testados, óleo e etilenoglicol em escoamento laminar. Portanto, o isolamento térmico da seção de testes mostrou ser apropriado para evitar perdas significativas de calor.

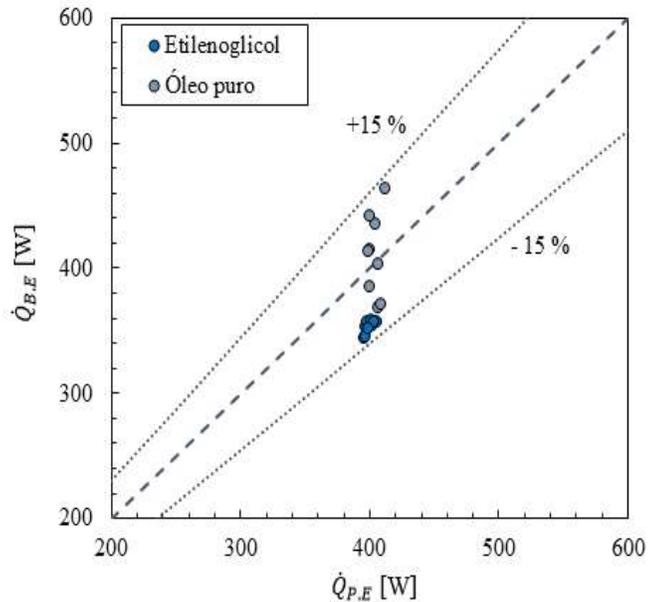


Figura 3.18 Resultados experimentais para comparação da potência elétrica “ $\dot{Q}_{P,E}$ ” e a potência calculada pelo balanço de energia “ $\dot{Q}_{B,E}$ ”

3.6.2 Coeficiente de transferência de calor

O método para determinar a taxa de transferência de calor local, q_{conv} , é simples uma vez que a condição de contorno definida de fluxo de calor constante é independente da direção x . Assim, a Fig. 3.19 apresenta uma ilustração esquematizada de um segmento da seção de testes, mostrando as resistências térmicas a partir das quais o coeficiente local de transferência de calor, $h(x)$, é calculado.

A transferência de calor total ao sistema é dada pela Eq. 3.5.

$$q'' = \frac{\dot{Q}}{A_s} \quad (3.5)$$

Onde \dot{Q} é a taxa de transferência de calor ao sistema, e $A_s = \pi DL$, é a área superficial interna de transferência de calor.

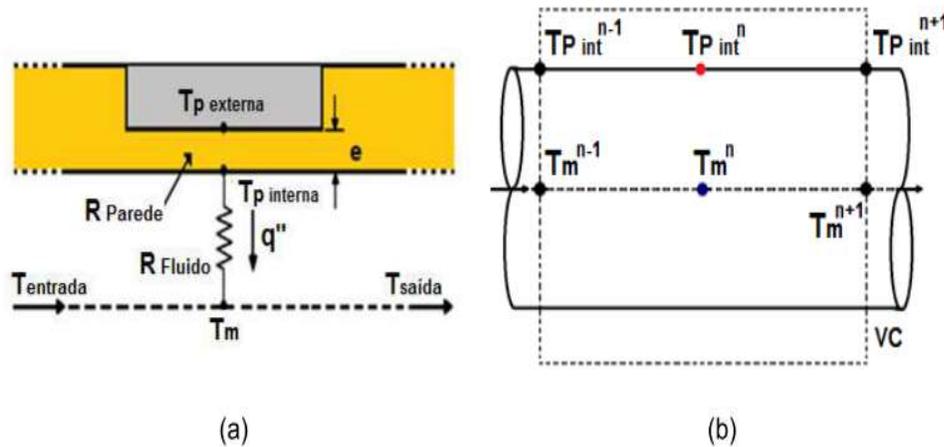


Figura 3.19 Diagramas esquematizados. (a) Resistências térmicas na seção de testes; (b) Volume de controle em torno da temperatura média do fluido.

Fonte: Adaptado de Cárdenas (2019)

Portanto, o coeficiente de transferência de calor por convecção é dado pela Eq. 3.6.

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (3.6)$$

Onde $T_s(x)$ é a temperatura superficial na posição axial no ponto x e $T_m(x)$ é a temperatura média do fluido na posição axial no ponto x e esta é descrita pela seguinte Eq. 3.7.

$$T_m(x) = T_{ent} + \frac{q''\pi D x}{\dot{m}c_p} \quad (3.7)$$

A temperatura local da superfície interna, T_s , é determinada pela Eq. 3.8, a partir da medição realizada pelos 8 termopares e os 8 PT100, localizados na superfície externa, $T_{p_{ext}}$, aplicando o conceito de resistência térmica que modela o processo da condução de calor através da parede do tubo.

$$T_s = T_{p_{ext}}(x) - \dot{Q}R_{parede} \quad (3.8)$$

Onde a resistência de parede do tubo, R_{parede} , é calculada pela Eq. 3.9.

$$R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi L k_{latão}} \quad (3.9)$$

A condutividade térmica do latão foi determinada através de uma regressão conseguida a partir de dados fornecidos pelo software EES (Engineering Equation Solver).

As propriedades termofísicas do fluido são calculadas para a temperatura de referência dada pela Eq. 3.10.

$$T_m = \frac{T_{ent} + T_{sai}}{2} \quad (3.10)$$

O coeficiente médio de transferência de calor por convecção h_m , foi calculado através da média dos valores calculados do coeficiente local, $h(x)$, nas diferentes posições axiais ao longo do tubo.

O número de Nusselt experimental é dado pela seguinte Eq. 3.11.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.11)$$

O número de Reynolds é descrito pela Eq. 3.12.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.12)$$

O comprimento de entrada hidrodinâmico L_h e o comprimento de entrada térmico L_t foram determinados a partir das Eq. 3.13 e Eq. 3.14, respetivamente.

$$L_h = 0,05 Re D \quad (3.13)$$

$$L_t = 0,05 Re Pr D \quad (3.14)$$

Onde o número de Prandtl é dado pela Eq. 3.15.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (3.15)$$

A literatura da área fornece algumas correlações diferentes, do ponto de vista teórico ou empírico, para prever o número de Nusselt para o fluxo laminar em função da distância axial adimensional, na forma do número de Graetz ou x/D . Buscando verificar a exatidão da configuração experimental, experimentos iniciais foram realizados com óleo e etilenoglicol como fluidos de comparação.

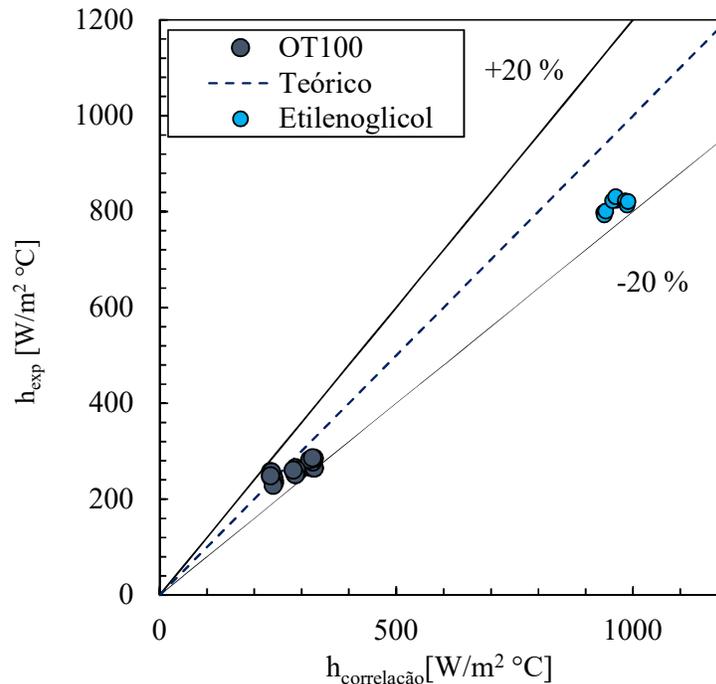


Figura 3.20 Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de Sieder e Tate (1936)

Os experimentos foram conduzidos em escoamento laminar desenvolvido hidrodinamicamente e uma região de entrada térmica verificada através dos cálculos teóricos ($L_t/D < 0,05 RePr$) por causa do baixo número de Reynolds e alto número de Prandtl do óleo. Os valores do coeficiente de transferência de calor medidos

experimentalmente são comparados com os valores obtidos pelo modelo teórico apresentado por Sieder e Tate (1936) com a Eq. 3.16.

$$Nu = 1,86 \left[\left(\frac{D}{L} \right) RePr \right]^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (3.16)$$

Os dados experimentais resultantes dos coeficientes de transferência de calor para óleo puro nos números de Reynolds em comparação com a previsão de Sieder e Tate (1936), são mostrados na Fig.3.20. Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para o óleo mineral LUBRAX-OT100, estão majoritariamente dentro da margem de erro $\pm 20\%$, apresentando um desvio médio de 10,13 % em relação ao modelo teórico. Assim, também é observado que os resultados experimentais para o etilenoglicol encontram-se dentro da margem de erro de 20 %, apresentando um desvio médio de 15,41 %. Por tanto, pode ser observado que os resultados experimentais mostraram uma boa concordância com o modelo teórico utilizado para a validação da bancada experimental.

3.6.3 Queda de pressão e fator de atrito

A queda de pressão foi medida por meio do transdutor diferencial instalado na bancada experimental. Entretanto, as medidas foram conferidas com os valores da diferença de pressão fornecidos pelos dois transmissores de pressão, posicionados na entrada e saída da seção de teste. É importante destacar que as medições necessárias para determinar o comportamento fluidodinâmico foram adquiridas simultaneamente com os testes térmicos. Os resultados experimentais do fator de atrito foram obtidos por meio da queda de pressão na seção de teste como descrito na Eq. 3.17.

$$f_{exp} = \frac{\pi^2 D^5 \rho \Delta P_{exp}}{8 \dot{m}^2 L} \quad (3.17)$$

Desta maneira, o fator de atrito foi avaliado nos 27 testes realizados para o óleo puro escoando no interior do tubo da seção de teste em regime laminar. A validação é baseada na comparação dos resultados experimentais com uma correlação amplamente

utilizada para a determinação deste parâmetro em escoamento em regime laminar descrita na Eq. 3.18, onde o escoamento está completamente desenvolvido hidrodinamicamente com perfil parabólico, também conhecido como distribuição de Hagen-Poiseuille.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.18)$$

Para uma faixa de aplicação de, $Re \leq 2300$.

Os resultados apresentados na Fig. 3.21 e Fig.3.22, mostram um desvio médio obtido de 22,81 % e 16,81 para o escoamento em regime laminar do óleo e etilenoglicol, respectivamente. Por tanto, pode ser observado que os resultados experimentais apresentaram uma boa concordância quando comparados com o modelo teórico utilizado para validar o equipamento experimental.

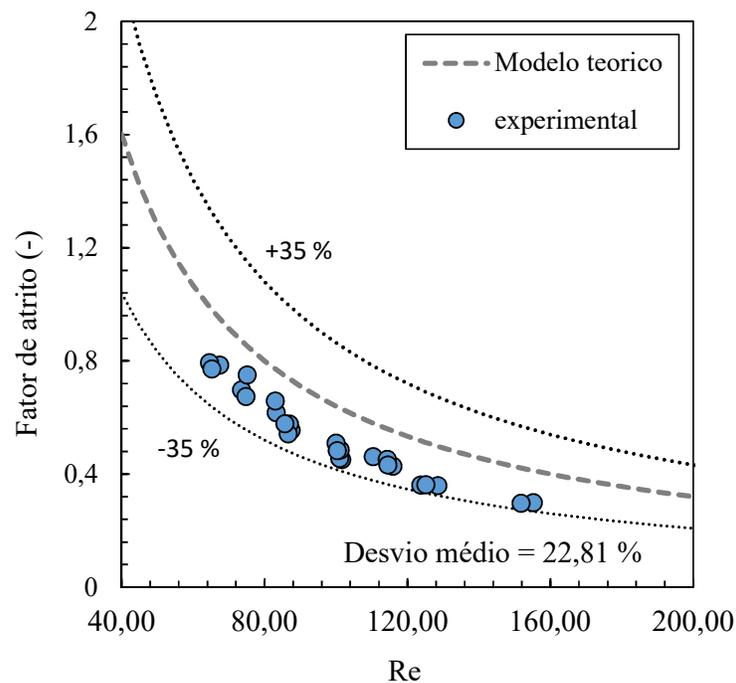


Figura 3.21 Comparação entre o fator de atrito experimental e teórico em função do número de Reynolds (Óleo base)

Fonte: Autor

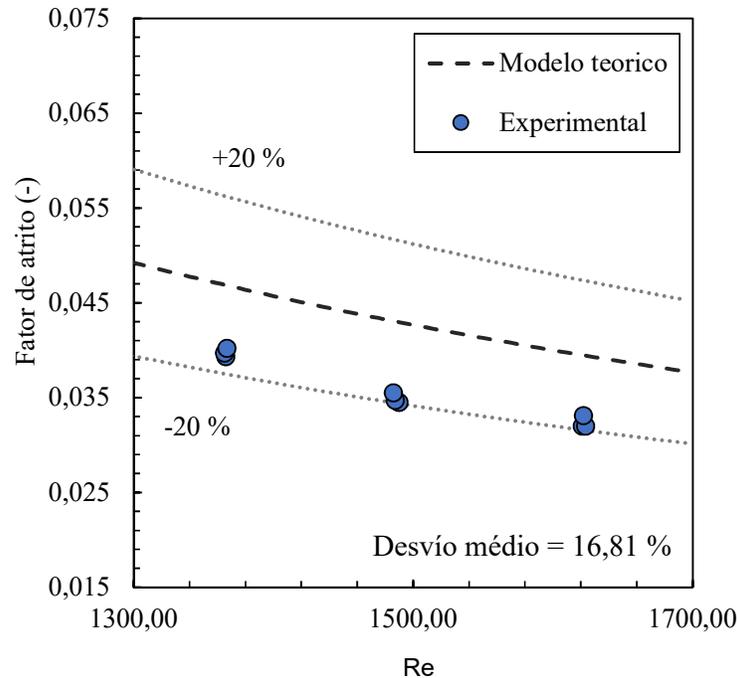


Figura 3.22 Comparação entre o fator de atrito experimental e o teórico em função do número de Reynolds (Etilenoglicol)

3.7 Análise de incertezas

A avaliação da incerteza dos parâmetros secundários foi determinada diretamente pelo software EES (Engineering Equation Solver), que fundamenta seus cálculos no método proposto por Kline & Mc-Clintock, apud (MOFFAT,1988). Segundo esses autores, se y , for um parâmetro secundário dependente de parâmetros primários obtidos através de medições independentes, $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, isto é

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \quad (3.19)$$

e,

$$y = y_m \pm \delta y \quad (3.20)$$

e se cada um das medidas x_i , for descrita como:

$$x_i = x_{mi} \pm \delta x_i \quad (3.21)$$

Onde, x_{mi} , é o valor médio do parâmetro, x_i , e δx_i é da incerteza da sua medida, portanto, a incerteza do parâmetro, y é dada por:

$$\delta y = \sqrt{[(Sx_1)(\delta x_1)]^2 + [(Sx_2)(\delta x_2)]^2 + [(Sx_3)(\delta x_3)]^2 + \dots [(Sx_n)(\delta x_n)]^2} \quad (3.22)$$

Onde, Sx_i , é denominada sensibilidade de y com relação ao parâmetro x_i , expresso por :

$$Sx_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (3.23)$$

Nesse sentido, as incertezas de medição dos parâmetros primários ou variáveis medidas pelos instrumentos de medição são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Incertezas de medição dos parâmetros primários ou variáveis medidas pelos instrumentos

Parâmetro	Instrumento	Faixa de medição	Incerteza
m	Balança	0,001 g – 1000 g	$\pm 0,001$ g
L,x	Trena	0 – 5 m	$\pm 0,005$ m
D	Paquímetro	0 – 0,20 m	$\pm 0,001$ m
T_p (x)	Termopar tipo T	-200 – 350 °C	$\pm 0,2$ °C
T_{ent} e $T_{saí}$	PT100	-200 – 500 °C	$\pm 0,2$ °C
\dot{m}	Medidor de vazão de Coriolis	0,005 kg/s – 0,168 kg/s	$\pm 0,15$ %
P_{ent} e $P_{saí}$	Transmissor de pressão	0 – 500 kPa	0,66 kPa
ΔP	Transmissão de pressão diferencial	0 – 500 kPa	$\pm 0,25$ %
I	NI9242	0 – 40 A	$\pm 0,01$ A
V	NI9246	0 – 320 V	$\pm 0,01$ V

Fonte: Autor

Assim, as incertezas das variáveis medidas e a propagação de incerteza para variáveis calculadas são apresentadas na Tabela 3.7. É importante ressaltar que o

intervalo de confiança adotado para as incertezas nas variáveis independentes foi de 95 %.

Tabela 3.7 Incertezas de medição dos parâmetros secundários ou variáveis calculadas dependentes das medições

Parâmetro	Incerteza
$\dot{Q}_{P,E}$	$\pm 1,20 \%$
$\dot{Q}_{B,E}$	$\pm 3,20 \%$
q''	$\pm 1,40 \%$
T_m	$\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Re	$\pm 0,21 \%$
f	$\pm 1,01 \%$
h_m	$\pm 8,41 \%$
Nu_m	$\pm 8,60 \%$

Fonte: Autor

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 Estabilidade dos nanofluidos

O comportamento da dispersão de nanopartículas no fluido base tem uma importância significativa para a estabilidade do nanofluido. As características de sedimentação dos nanofluidos preparados (CNT e CNT+AO) foram investigadas utilizando dois métodos de análise (inspeção visual e espectrofotometria UV-VIS). Os resultados da análise são apresentados a seguir.

4.1.1 Análise de inspeção visual

Esta seção se destina à apresentação da análise qualitativa por inspeção visual. Os resultados obtidos a partir dos registros fotográficos serão apresentados e discutidos a seguir para cada um dos grupos de nanofluidos (CNT e CNT+AO) preparados neste trabalho.

4.1.1.1 Nanofluidos sem tratamento superficial (CNT)

Na Fig. 4.1 são apresentados os resultados do método de inspeção visual empregado para os nanofluidos sem tratamento superficial de nanopartículas (CNT). Os registros mostram uma dispersão estável após de um mês da sua preparação. Entretanto, os resultados no segundo mês após da sua preparação mostram uma alta sedimentação com floculação de aglomerados.

Esse comportamento pode ser atribuído à energia externa empregada no processo da dispersão (sonicação de alta frequência) que não foi suficiente para reduzir o tamanho do diâmetro médio dos aglomerados de nanotubos de carbono de parede múltipla, o que pode ter levado à formação de aglomerados ainda maiores e posteriormente à sedimentação evidenciada (HWANG et al., 2008). A formação de aglomerados pode estar associada à dificuldade no domínio das forças de repulsão eletrostáticas de dupla camada, forças de hidratação e forças estéricas sobre as interações de van der Waals entre nanopartículas. Além disso, também pode ser

atribuída a sedimentação de nanopartículas aos efeitos gravitacionais como foi descrito por (REHMAN et al., 2019b).

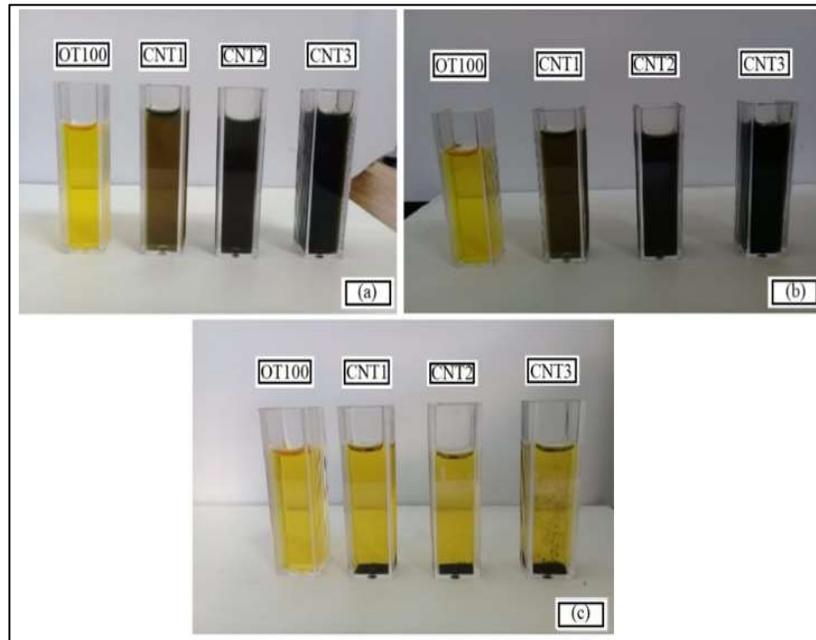


Figura 4.1 Fotos das amostras de nanofluidos CNT; (a) no primeiro dia da preparação; (b) após 1 mês da preparação; (c) após 2 meses da preparação

4.1.1.2 Nanofluidos com tratamento superficial de nanopartículas (CNT+AO)

Na Fig. 4.2 são apresentados os resultados da análise de inspeção visual. É observada uma excelente estabilidade da dispersão após três meses. Constatou-se que a adição de ácido oleico proporcionou uma melhor interação dos nanotubos de carbono no óleo. Também foi notado que o revestimento com ácido oleico fez com que os nanotubos de carbono permanecessem dispersos no óleo sem formar aglomerados densos, que se estratificam no fundo do recipiente.

Esse comportamento pode ser inferido a que o ácido oleico promoveu a formação de uma camada orgânica na superfície dos nanotubos de carbono causando o impedimento estérico entre elas e promovendo a estabilização. Dessa maneira, este resultado pode ser direcionado para o domínio das forças de repulsão eletrostáticas de dupla camada, forças de hidratação e forças estéricas sobre as interações de van der Waals entre nanopartículas, mediante a adsorção física realizada pelas nanopartículas ao serem revestidas com o ácido oleico.

Apesar do método de análise por inspeção visual ser um método não preciso e subjetivo, foi uma boa forma de analisar a estabilidade temporal dos nanofluidos produzidos, indicando, de forma qualitativa, a estabilidade dos nanofluidos avaliados.

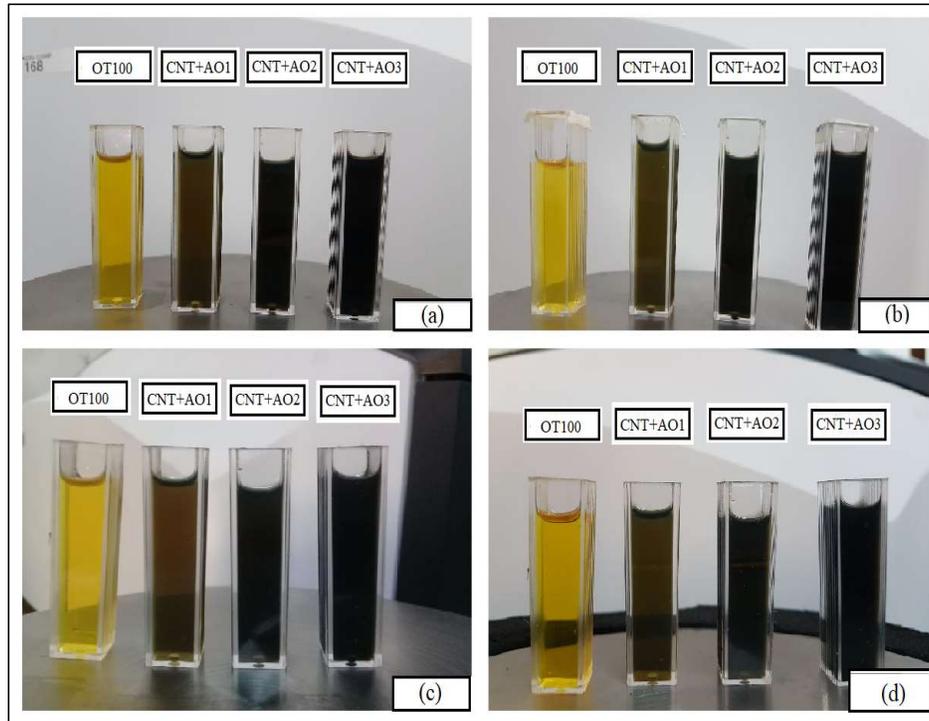


Figura 4.2 Fotos das amostras de nanofluidos CNT+AO (a) no primeiro dia da preparação; (b) após 1 mês da preparação; (c) após 2 meses da preparação; (d) após 3 meses da preparação.

4.1.2 Análise espectrofotometria UV-VIS

Para estimar quantitativamente a estabilidade dos nanofluidos e estimar quantitativamente a estabilidade dos nanofluidos, uma eficiente, confiável e útil técnica, proposta por Jiang et al., (2003) e conhecida como espectrofotometria UV-Visível, tem sido adotada neste trabalho.

Após os nanofluidos terem sido produzidos pelo método de dois passos, foi separada uma amostra em cubetas de 5 ml (como foi possível observar na Fig.4.1 e Fig.4.2 na análise de inspeção visual relativas à análise visual) para cada um dos nanofluidos preparados. O Espectrofotômetro UV-1900 da SHIMADZU foi o equipamento utilizado para esta realizar a análise.

Os espectros de absorção para cada uma das amostras foram obtidos para o dia 1, dia 30 e dia 60, após a preparação. É importante destacar que nos resultados obtidos no primeiro dia foi verificada uma relação linear entre a concentração de nanopartículas (MWNCT) e a absorbância, relação que está de acordo com a Lei de Lambert-Beer. Por isso, para quantificar a concentração relativa de nanopartículas (MWCNT) em suspensão ao longo do tempo de sedimentação, foi realizada uma regressão linear obtida dos resultados no primeiro dia de teste entre a concentração sólida de partículas e absorbância, para um comprimento de onda específico (497 nm). A Fig.4.3, apresenta a relação linear entre absorbância e a concentração de nanotubos de carbono (MWCNT) em suspensão. A relação linear entre a absorbância e a concentração de nanotubos de carbono em suspensão, pode ser expressa pela Eq. 4.1:

$$C = 0,0105A - 0,0095 \quad (4.1)$$

Onde A, é o valor de absorbância e wt.% é a concentração mássica de nanotubos de carbono em suspensão. O valor do erro para esta regressão foi de $R^2 = 0,9995$.

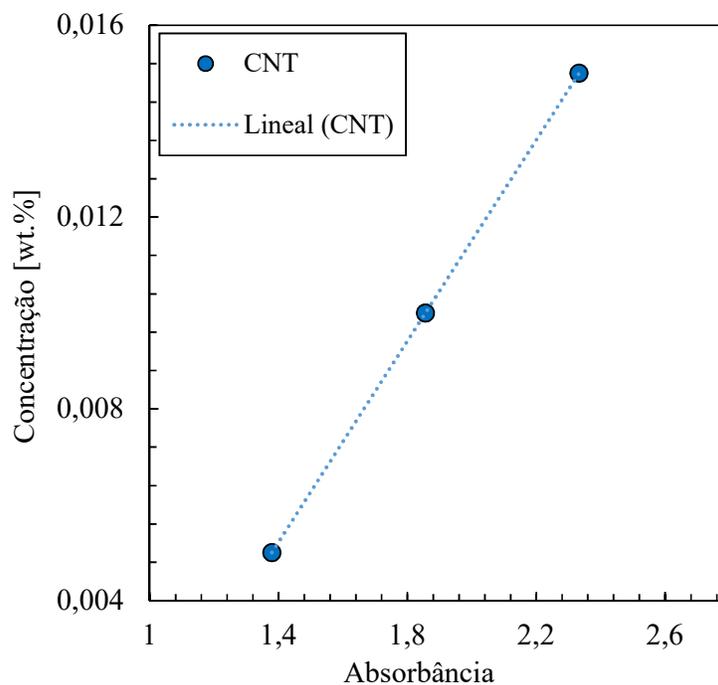


Figura 4.3 Relação linear entre a absorbância e a concentração de nanotubos de carbono de paredes múltiplas suspensas no óleo em um comprimento de onda de 497 nm.

4.1.2.1 Análise de estabilidade por espectrofotometria dos nanofluidos CNT

A absorvância das suspensões de nanotubos de carbono sem tratamento superficial dispersas no óleo pode ser observada na Fig. 4.4 em diferentes dias para uma faixa de comprimento de onda de 490 - 700 nm. Pode ser observado que o valor da absorvância decresce com o aumento do tempo de sedimentação para todas as amostras de nanofluidos. Além disso, pode ser visto que a absorvância medida no dia 60 e 90 após da preparação diminuiu drasticamente, indicando uma alta sedimentação de nanotubos de carbono. Os resultados deste grupo de nanofluidos encontram-se de acordo com os registros da análise por inspeção visual.

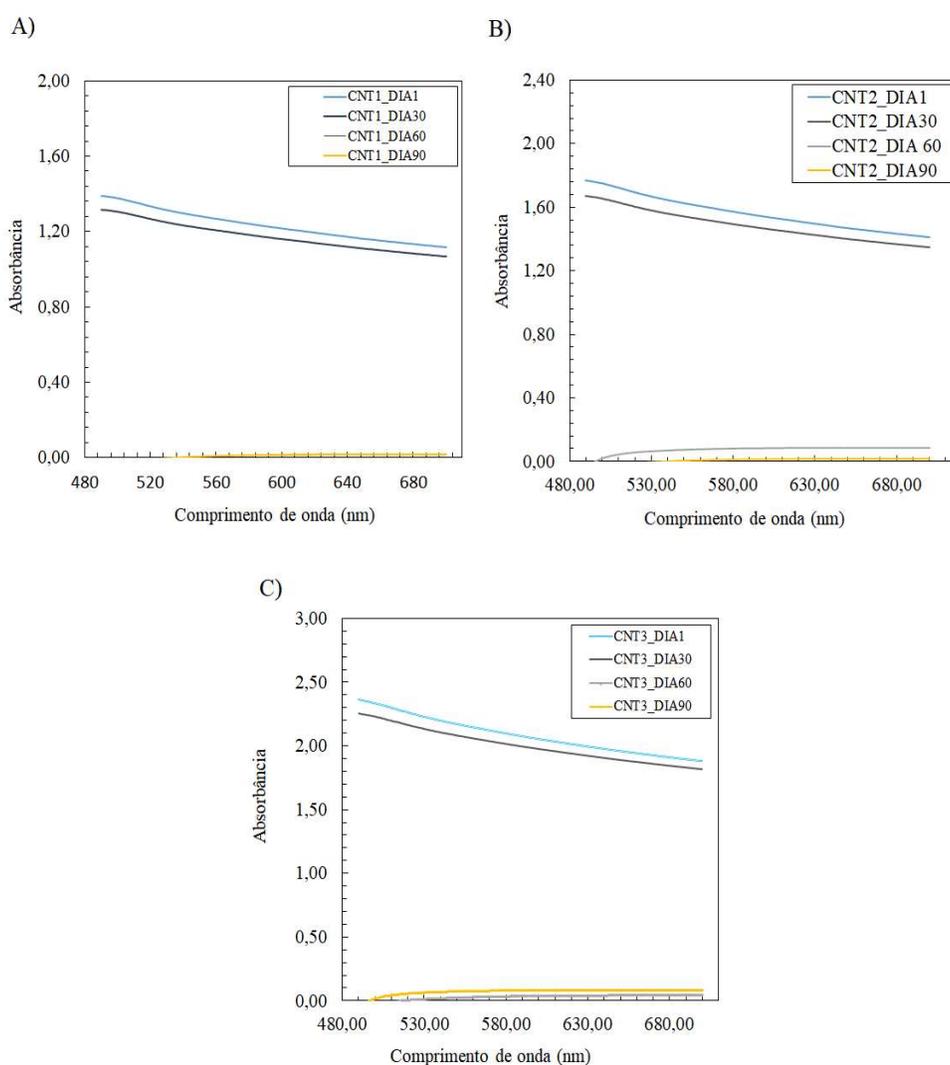


Figura 4.4 Espectro UV-VIS de nanotubos de carbono (MWCNT) sem tratamento superficial suspensos em óleo em diferentes dias. A) CNT_1; B) CNT_2; C) CNT_3

4.1.2.2 Análise de estabilidade por espectrofotometria dos Nanofluidos CNT+AO

A estabilidade do segundo grupo de nanofluidos produzidos com as nanopartículas (MWCNT) com tratamento superficial pelo revestimento com ácido oleico foi investigada. Os valores de absorvância para cada um dos nanofluidos deste grupo são apresentados na Fig.4.5 para o um espectro de 490 – 700 nm. É observado que a absorvância decresce com o aumento do tempo de sedimentação para todas as amostras de nanofluidos. Este comportamento está de acordo com o obtido por Hwang et al., (2008) e Rehman et al., (2019) para nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo.

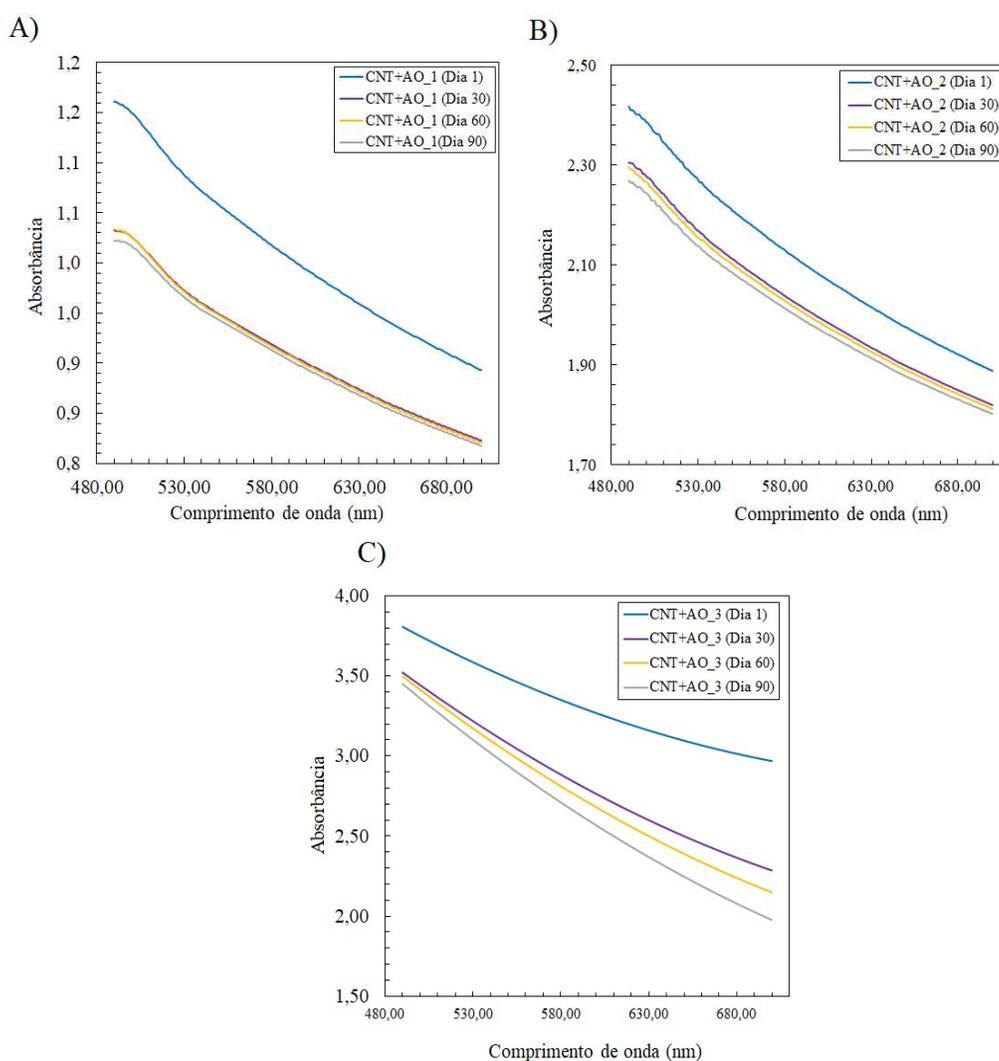


Figura 4.5 Espectro UV-VIS de CNT+AO suspensos em óleo. a) CNT+AO_1; b) CNT+AO_2; c) CNT+AO_3.

4.1.2.3 Determinação da concentração relativa ao longo do tempo

Com o intuito de determinar a concentração relativa de nanotubos de carbono suspensa no óleo ao longo do tempo de sedimentação nos diferentes dias de teste para cada uma das amostras de nanofluidos, foi utilizada a Eq. 4.1 para o cálculo da concentração em cada um dos dias de teste. Desta maneira, a concentração relativa de nanotubos de carbono suspensa no óleo pode ser expressa pela Eq. 4.2.

$$CR = \frac{C}{C_0} \quad (4.2)$$

Onde CR, é a concentração relativa de nanotubos de carbono suspensa no óleo, C é a concentração calculada no dia do teste e C_0 é a concentração determinada no primeiro dia.

Na Fig.4.6 pode ser observada a concentração relativa de nanopartículas para cada um dos nanofluidos estudados em função do tempo de sedimentação calculada por meio da Eq.4.2. É verificado que os nanofluidos sem tratamento superficial (CNT) apresentaram a pior estabilidade, mostrando no dia 60 uma sedimentação de 93,25 %, 94,43 % e 94,94 % para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respectivamente.

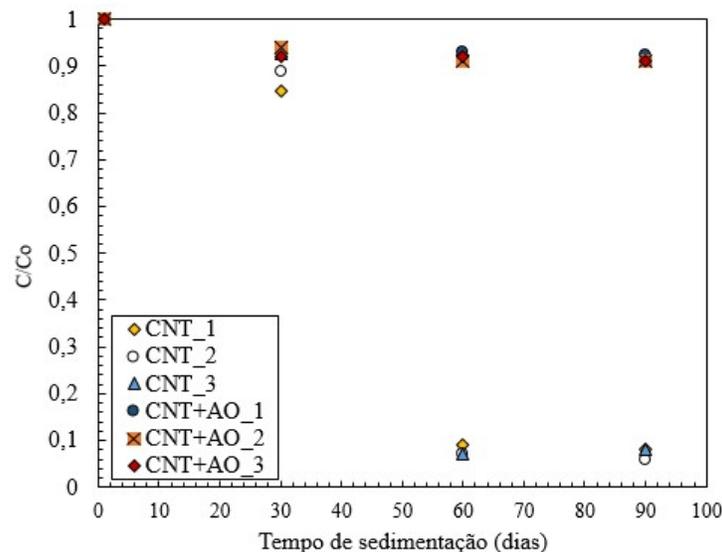


Figura 4.6 Concentração relativa de nanopartículas dos nanofluidos em função do tempo de sedimentação.

É observado que os nanofluidos com tratamento superficial (CNT+AO) mostraram uma excelente estabilidade, inclusive 90 dias após da sua preparação. Neste dia, este grupo de nanofluidos mostram um 7,68 %, 8,23 % e 9,49 % de concentração sedimentada para CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respectivamente.

O uso do método de espectroscopia UV-VIS mostrou uma boa concordância com os resultados obtidos a partir da análise qualitativa por inspeção visual. Dessa maneira, foi uma boa forma de avaliar a estabilidade dos nanofluidos produzidos de uma maneira quantitativa.

4.2 Propriedades termofísicas

4.2.1 Massa específica

Nesta seção, os resultados em torno da análise da massa específica serão apresentados para as duas categorias estabelecidas na preparação dos nanofluidos (nanofluidos sem tratamento superficial, CNT, e nanofluidos com tratamento superficial, CNT+AO). Para validar os ensaios experimentais da massa específica foram realizados primeiramente os experimentos com água destilada em uma faixa de 10 °C até 90 °C e comparados com dados do EES, como pode ser observado na Fig.4.7

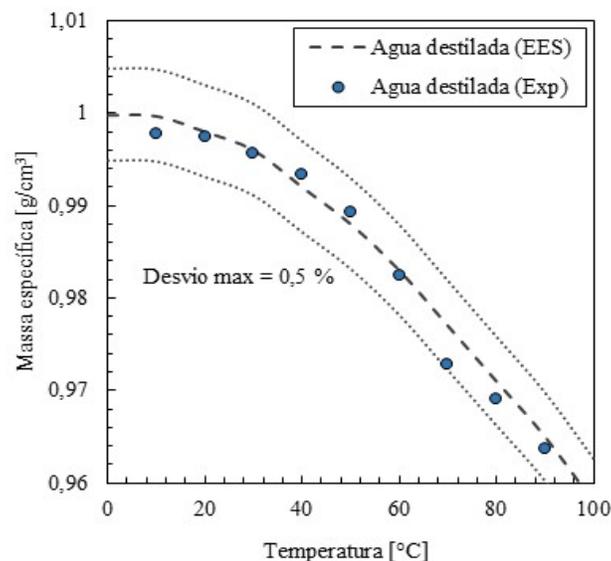


Figura 4.7 comparação e validação dos valores experimentais da massa específica obtidos para água destilada

Os experimentos com água destilada foram feitos variando a temperatura de 10 °C a 90 °C com intervalos de 10 °C. Os resultados mostraram uma boa concordância com as tabelas termodinâmicas, obtendo um desvio máximo de 0,5 %. Para observar o comportamento da massa específica dos nanofluidos para as amostras utilizadas neste estudo foram realizadas medições para uma faixa de 20 °C a 100 °C com incrementos de 10 °C. Os resultados de massa específica dos nanofluidos são apresentados a seguir.

4.2.1.4 Massa específica de nanofluidos sem tratamento superficial (CNT)

Na Fig. 4.8 são apresentados os resultados experimentais da massa específica das amostras de nanofluido produzidos sem tratamento superficial (CNT) em cada uma das três concentrações produzidas. Os resultados foram comparados com a massa específica do fluido base em função da temperatura nas quais foram realizadas as medições.

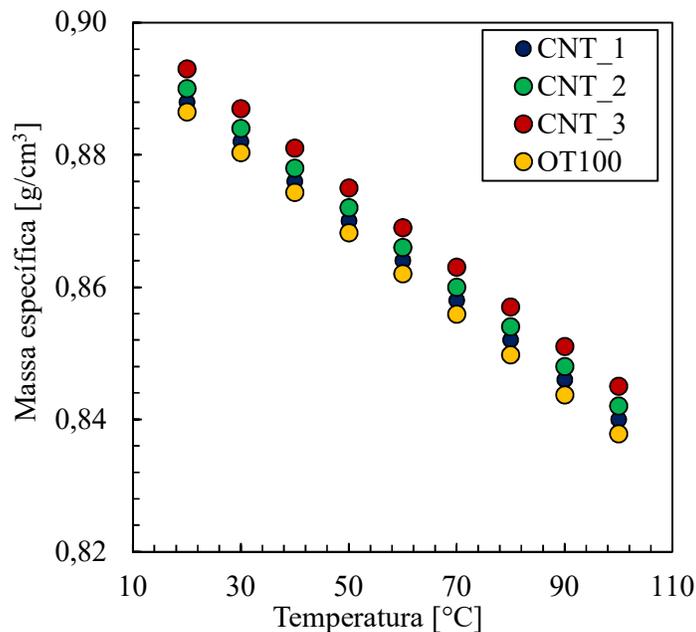


Figura 4.8 Massa específica em função da temperatura (CNT)

Os resultados experimentais para massa específica dos nanofluidos sem tratamento superficial (CNT) apresentaram uma boa concordância com os resultados

obtidos por diferentes autores como (Cárdenas, 2019). Pode ser observado pela Fig. 4.8, que a massa específica de todos os nanofluidos apresentou uma diminuição em função da temperatura do fluido. Na Fig. 4.9 pode ser observada a massa específica relativa para cada uma das contrações volumétricas em função da temperatura. Constatou-se que a maior concentração de nanopartículas dos nanofluidos sem tratamento superficial mostrou um incremento máximo de 0,86 % em relação ao fluido base. Por tanto pode ser afirmado que não foram observadas diferenças significativas na massa específica dos nanofluidos CNT.

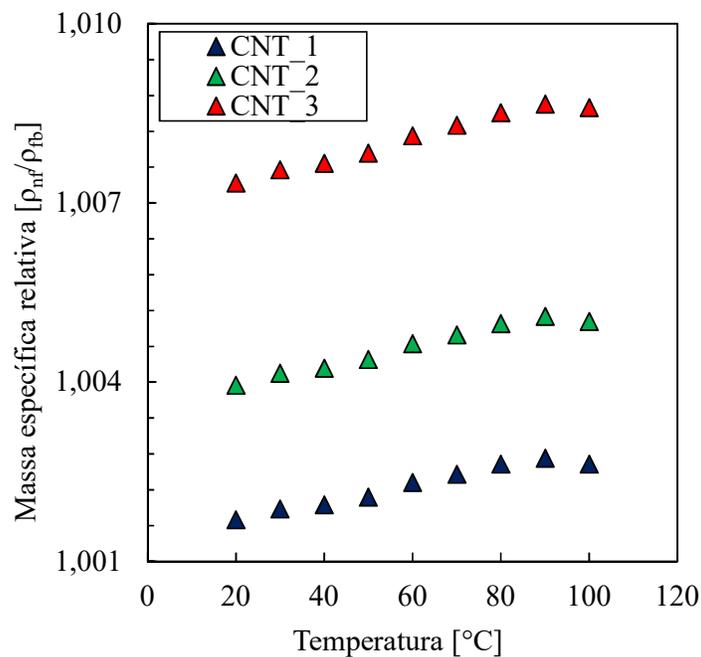


Figura 4.9 Massa relativa em função da temperatura (CNT)

4.2.1.5 Massa específica de nanofluidos com tratamento superficial (CNT+AO)

Na Fig.4.10, são apresentados os resultados experimentais da massa específica de todas as amostras de nanofluido produzidos com tratamento superficial de nanopartículas para cada concentração. Os resultados foram comparados com a massa específica do fluido base em função da temperatura nas quais foram realizadas as medições. Os resultados mostram um incremento da massa específica com a concentração de nanopartículas. Além disso, pode ser visto que a massa específica diminuiu para todas as concentrações estudadas dessa categoria de nanofluidos.

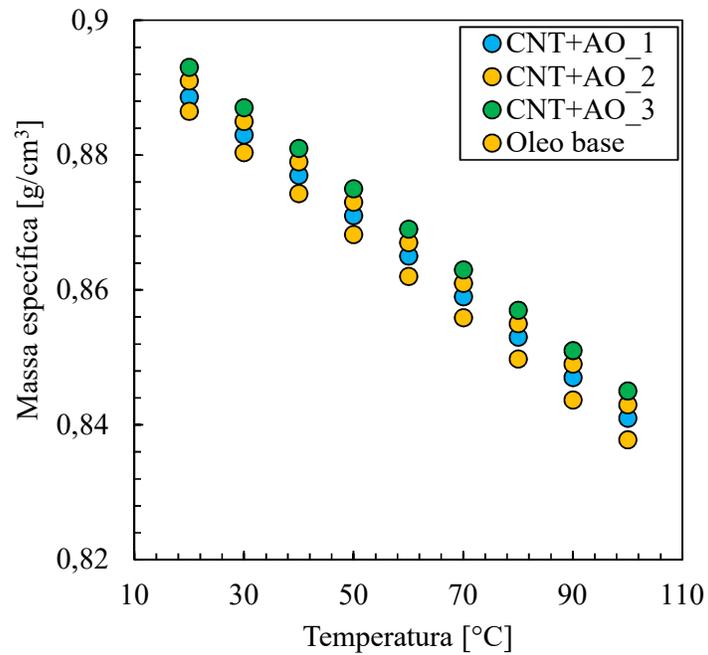


Figura 4.10 Massa específica dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de oleo com tratamento superficial de nanopartículas (CNT+AO)

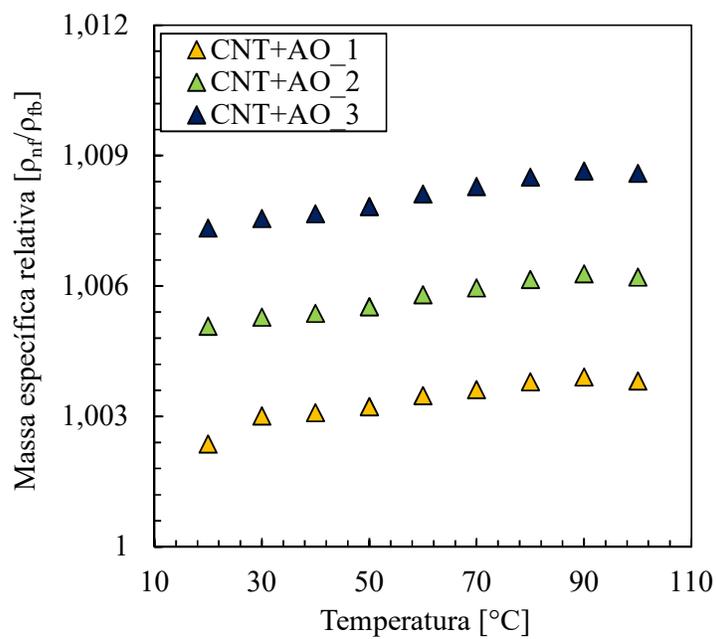


Figura 4.11 Massa específica relativa dos nanofluidos CNT+AO

A massa específica relativa de cada um dos nanofluidos para cada uma das temperaturas é apresentada na Fig.4.11. É observado que o máximo incremento apresentado na massa específica foi apenas de 0,84 % para o nanofluido CNT+AO_3. Por tanto pode ser afirmado que para os nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo com tratamento superficial de nanopartículas, a massa específica dos nanofluidos dentro da faixa de temperatura avaliada não apresentou diferenças significativas.

Com fins de comparação, a Fig. 4.12 mostra um desvio máximo de $\pm 0,3$ % entre a massa específica de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo medida experimentalmente a 50 °C e a estimada utilizando o modelo de Pak e Cho (1998), representado pela Eq. 2.16. Dessa forma, conclui-se que esse modelo se mostrou como um bom estimador da massa específica dos nanofluidos produzidos.

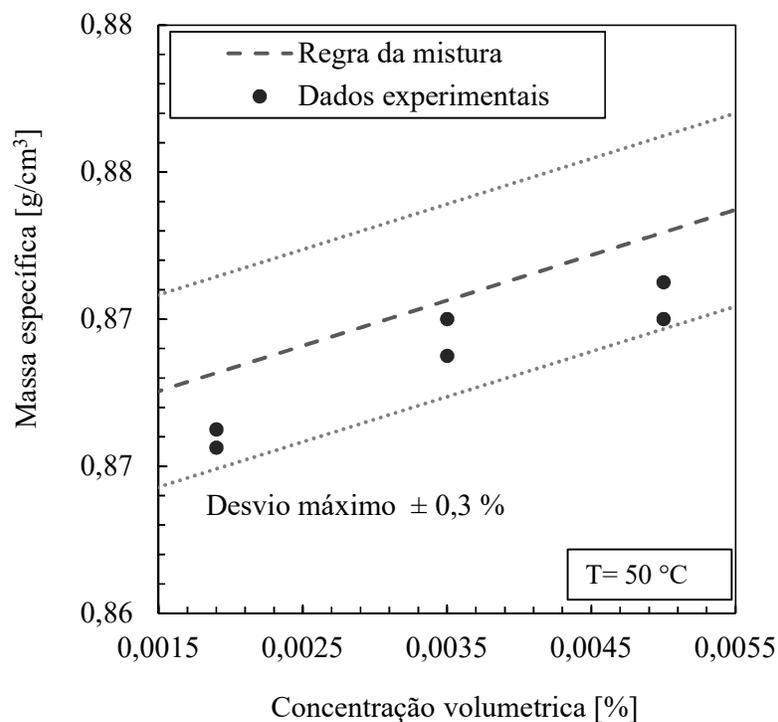


Figura 4.12 Comparação da massa específica experimental de nanofluidos deste trabalho em função da concentração volumétrica de nanopartículas (MWCNT) 50 °C e dados estimados pelo modelo de Pak e Cho (1998)

4.2.2 Calor específico

O calor específico dos nanofluidos foi determinado assumindo o equilíbrio térmico entre as nanopartículas e o fluido base. Foi adotado um modelo dado pela Eq. 2.15, o qual considera a concentração volumétrica de partículas ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos $(\rho c_p)_{fb}$ e $(\rho c_p)_{np}$.

A Fig.4.13, ilustra o comportamento do calor específico dos nanofluidos sem tratamento superficial com a temperatura. Observa-se que o valor do calor específico dos nanofluidos quando comparados com o fluido base (OT100) diminui com o aumento da concentração de nanopartículas. Pode ser observado que o maior decremento é encontrado na maior concentração e maior temperatura com 0,8 % em relação ao fluido base. Esse comportamento pode ser atribuído a que o calor específico das nanopartículas é menor que o calor específico do fluido base. Dessa maneira, é possível dizer que o calor específico resultante de uma mistura diminuirá em função do aumento da concentração de nanopartículas.

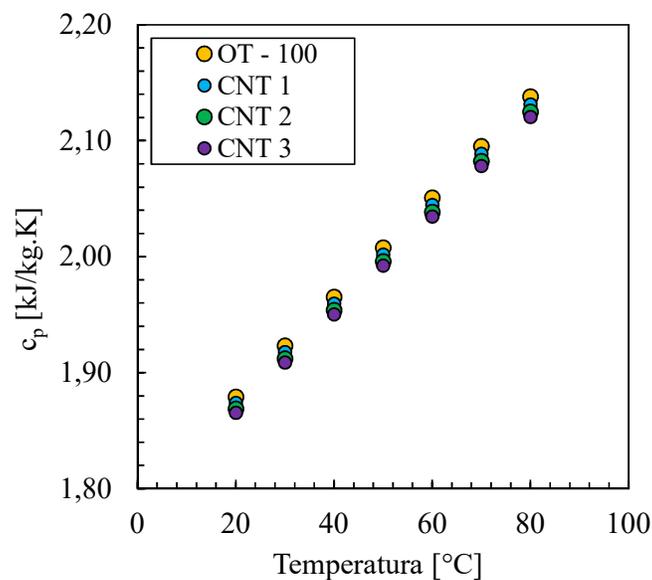


Figura 4.13 Calor específico dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo

Essa propriedade possui um papel de grande importância no desempenho térmico dos nanofluidos. Assim, é importante ressaltar que o modelo empregado para a

determinação do calor específico das amostras de nanofluidos não considera a morfologia, tamanho, ou tratamento superficial das nanopartículas. Nesse sentido, não foi necessário apresentar os valores do calor específico dos nanofluidos CNT+AO, devido ao fato de que os valores seriam os mesmos valores apresentados para os CNT.

Murshed (2011) investigou o calor específico de nanofluidos de óxido de titânio (TiO₂) a base de etilenoglicol com nanopartículas de diferentes tamanhos e morfologias (nanopartículas esféricas e cilíndricas), evidenciando que os resultados obtidos apresentaram valores quase idênticos de calor específico e demonstrando uma boa concordância com os valores obtidos pelo modelo teórico da Eq. 2.15.

4.2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica do fluido base e dos dois grupos de nanofluidos CNT e CNT+AO foram medidos experimentalmente pelo método da ponte quente transiente (*Transient Hot Bridge*) em uma faixa de temperatura de 20 °C até 60 °C com intervalos de 10 °C. A fim de se obter maior confiabilidade nas leituras, o processo de medição foi repetido em doze leituras para cada temperatura. Depois que foram feitas todas as medições realizadas para condutividade térmica, verificou-se os aumentos de cada um dos nanofluidos comparando seus resultados experimentais com os do fluido base. A seguir são apresentados os resultados experimentais das medições realizadas da condutividade térmica para cada um dos grupos de nanofluidos produzidos.

4.2.3.1 Condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono sem tratamento superficial (CNT)

Na Fig.4.14, são apresentados os resultados das medições de condutividade térmica de nanofluidos CNT. Primeiramente, é importante ressaltar a boa concordância entre os resultados obtidos experimentalmente da condutividade térmica do fluido base (OT100) e os dados fornecidos pela ficha técnica da PETROBRAS, os quais apresentaram um desvio máximo de 0,45 % dentro da faixa de temperatura analisada.

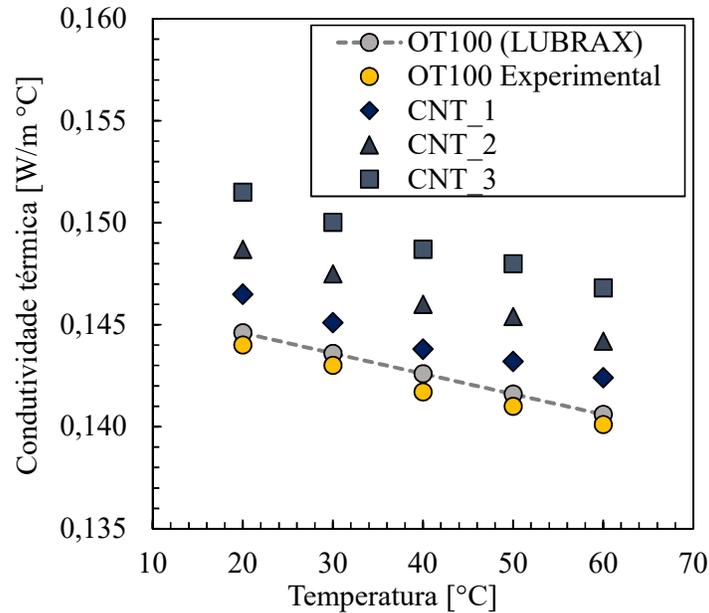


Figura 4.14 Condutividade térmica em função da temperatura dos nanofluidos CNT

Na Fig.4.15 pode ser observado que a condutividade térmica dos nanofluidos aumenta com o incremento da concentração sólida de partículas dos nanofluidos de CNT em cada uma das temperaturas avaliadas quando comparados com os valores de condutividade térmica do fluido base. Além disso, é observado que a condutividade térmica para o óleo puro e nanofluidos decresce com a temperatura. Esse comportamento é comum na medição de condutividade térmica de óleos e tem sido relatado por vários autores como Ilyas et al. (2017), Wei et al., (2017) e Aberoumand et al., (2016).

Com o intuito de observar com maior detalhe os incrementos obtidos na condutividade térmica para cada um dos nanofluidos CNT, a Fig4.15 ilustra os resultados da condutividade térmica relativa em função da temperatura. Dessa maneira, pode ser observado que os incrementos na condutividade térmica das amostras de nanofluidos CNT foram, em valores médios, de 2,05 %, 3,67 % e 5,35 % para CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respectivamente. Os incrementos na condutividade térmica dos nanofluidos também podem ser atribuídos às interações entre partículas e ao movimento

browniano, no entanto essas interações podem ter sido minimizadas devido à alta viscosidade do óleo (OT100).

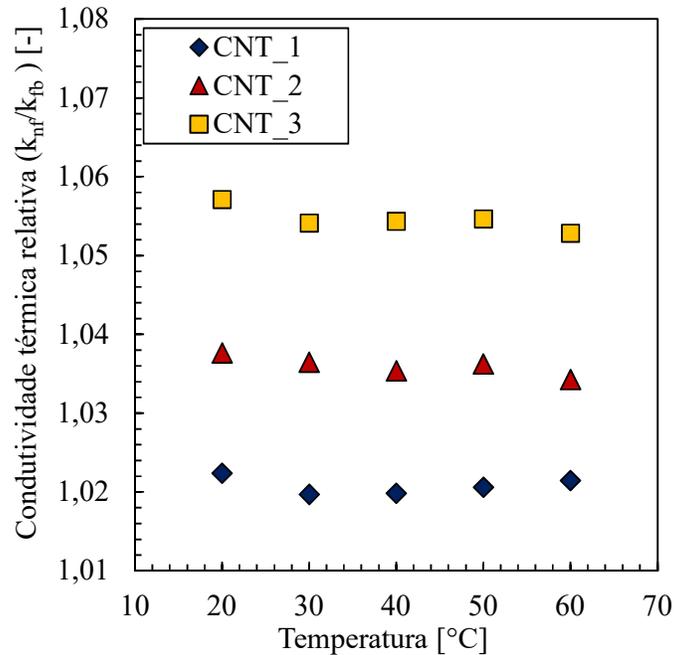


Figura 4.15 Condutividade térmica de nanofluidos CNT em função da temperatura

4.2.3.2 Condutividade térmica dos nanofluidos com tratamento superficial (CNT+AO)

Na Fig.4.16 são apresentados os resultados experimentais das medições de condutividade térmica para os nanofluidos de CNT+AO. Pode ser observado que as amostras dos nanofluidos CNT+AO apresentam um aumento na condutividade térmica com o incremento da adição de nanopartículas. Este comportamento foi consistente com os resultados obtidos em relação aos nanofluidos de CNT.

Nesse sentido, com o intuito de verificar com maior detalhe os incrementos obtidos para este grupo de amostras de nanofluidos, na Fig.4.17, apresenta-se a condutividade térmica relativa para cada uma das amostras de CNT+AO em função de temperatura. Assim, os incrementos na condutividade térmica dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo com tratamento superficial de nanopartículas (CNT+AO) foram, em média, 1,46 %, 3,14 % e 4,44 % para os CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respectivamente.

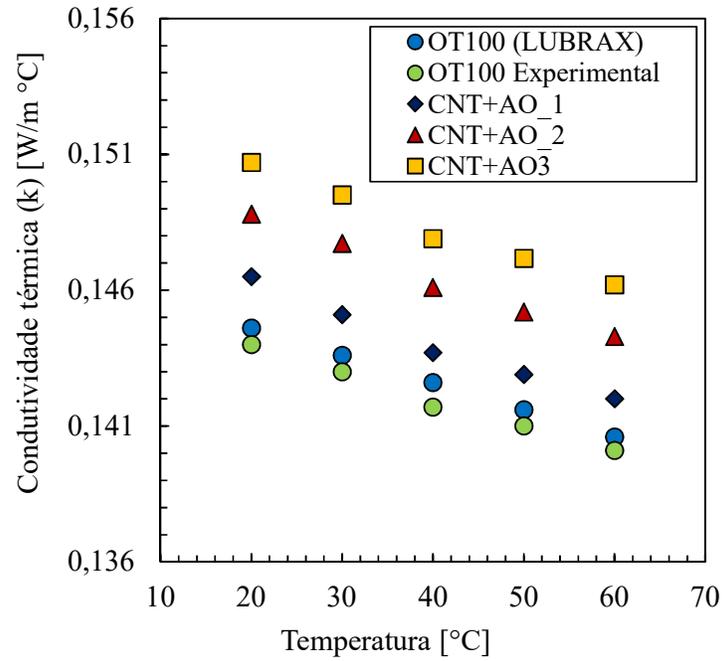


Figura 4.16 - Condutividade térmica de nanofluidos CNT+AO em função da variação de temperatura

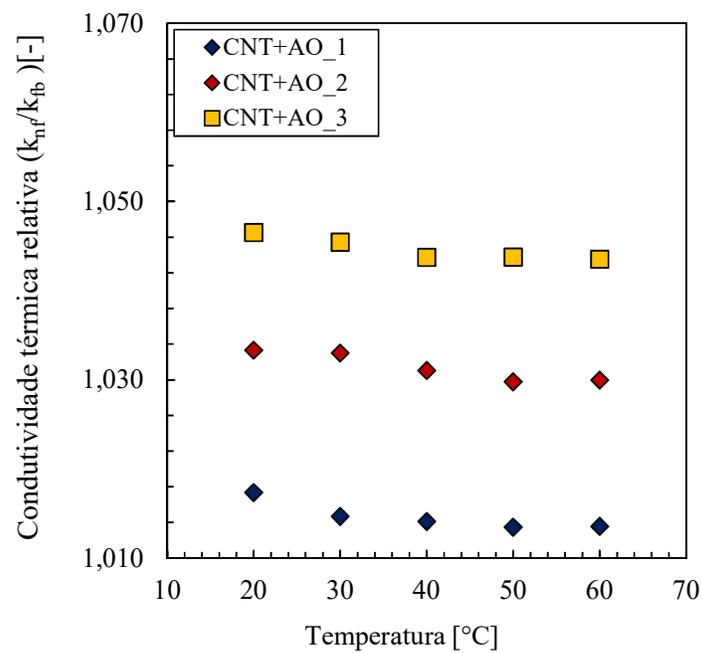


Figura 4.17 Condutividade térmica relativa dos nanofluidos CNT+AO em função da temperatura

Os incrementos na condutividade térmica dos nanofluidos podem ser atribuídos a natureza e interação das nanopartículas, porém estes incrementos podem ter sido minimizados devido à viscosidade do fluido base e o tratamento superficial na superfície das nanopartículas realizado com ácido oleico.

4.2.4 Viscosidade

A viscosidade dinâmica do fluido base (OT100) e dos dois grupos de nanofluidos produzidos (CNT e CNT+AO) foi medida experimentalmente nas faixas de temperaturas estabelecidas com auxílio do viscosímetro rotacional, modelo Stabinger SVM 3000 da Anton-Paar. A seguir são apresentados os resultados experimentais das medições para cada grupo de nanofluidos.

4.2.4.1 Viscosidade dinâmica de nanofluidos CNT

A Fig.4.18 apresenta os resultados experimentais das medições de viscosidade dinâmica dos nanofluidos CNT. Primeiramente, pode ser observado que a viscosidade dinâmica diminui com o aumento da temperatura mostrando uma tendência não linear para o fluido base e os amostras dos nanofluidos CNT_1, CNT_2 e CNT_3. Esse comportamento é comumente encontrado na literatura, e é atribuído a dissociação de ligações devido ao enfraquecimento da força intermolecular de atração entre as moléculas do óleo como foi descrito por (ILYAS et al., 2017a).

Entretanto, os perfis de viscosidade dinâmica versus temperatura de todos os nanofluidos e do fluido base que foram testados mostrados na Fig.4.18, são muito semelhantes e guardam uma margem muito estreita de variação nos valores desta propriedade. Em outras palavras, percebe-se nestes gráficos que os valores de viscosidade dinâmica permanecem praticamente inalterados com a variação da concentração de partículas em suspensão.

Nesse sentido, para obter uma visão mais detalhada dos aumentos como função da concentração sólida de partículas, mostra-se a Fig.4.19. Verificou-se que a concentração de partículas tem um efeito significativo sobre a viscosidade do fluido. Um aumento na viscosidade dinâmica é observado com o incremento da concentração de nanopartículas.

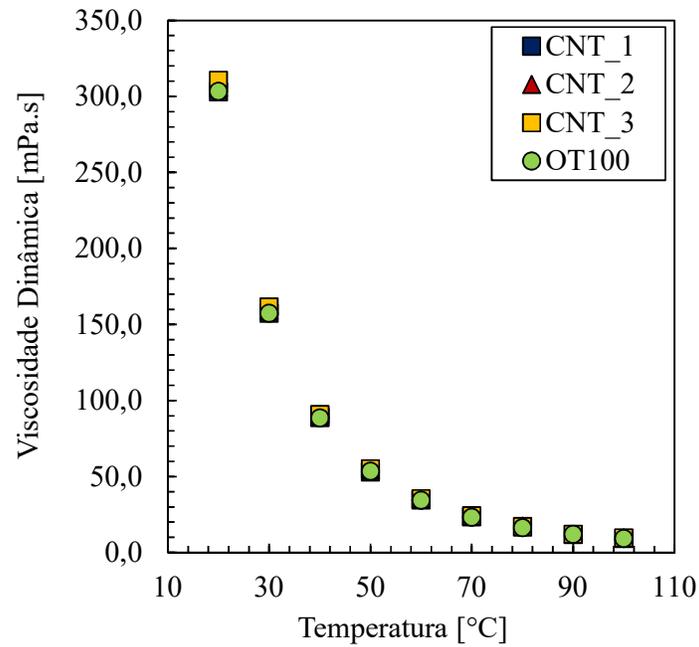


Figura 4.18 Viscosidade dinâmica de nanofluidos CNT em função da temperatura

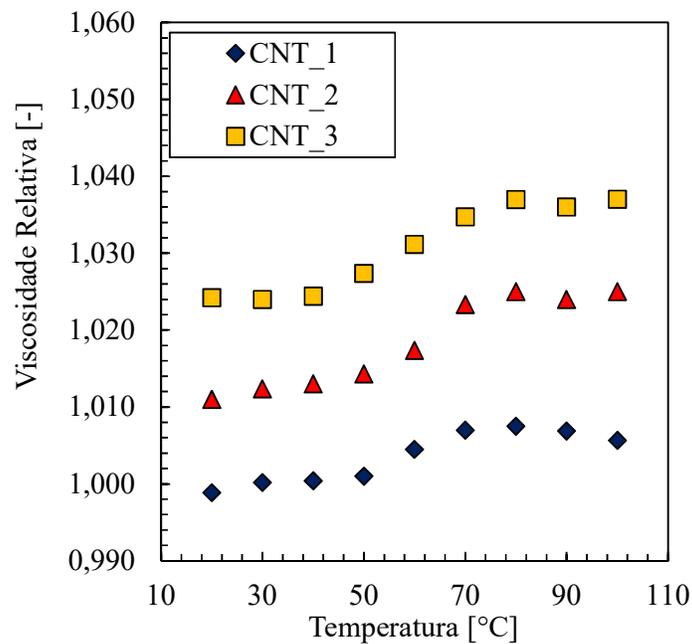


Figura 4.19 Viscosidade relativa dos nanofluidos CNT em função da temperatura

É importante ressaltar que, um aumento na viscosidade do óleo pode causar um impacto negativo na eficiência da aplicação de transferência de calor. Portanto, um

aumento significativo na viscosidade não é preferido em operações industriais para aplicações específicas. Os aumentos da viscosidade dinâmica dos nanofluidos CNT foram, em média, 0,45 %, 1,85 % e 3,12 % para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respetivamente. Os incrementos na viscosidade dinamica dos nanofluidos CNT podem ser atribuídos à adição de nanopartículas no fluido base.

4.2.4.2 Viscosidade dinâmica de nanofluidos CNT+AO

Na Fig.4.20 são apresentados os resultados experimentais das medições de viscosidade dinâmica dos nanofluidos CNT+AO. Pode ser observado que o comportamento deste grupo de nanofluidos produzidos é similar com os do grupo CNT, mostrando um decrescimento na viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura com uma tendência não linear.

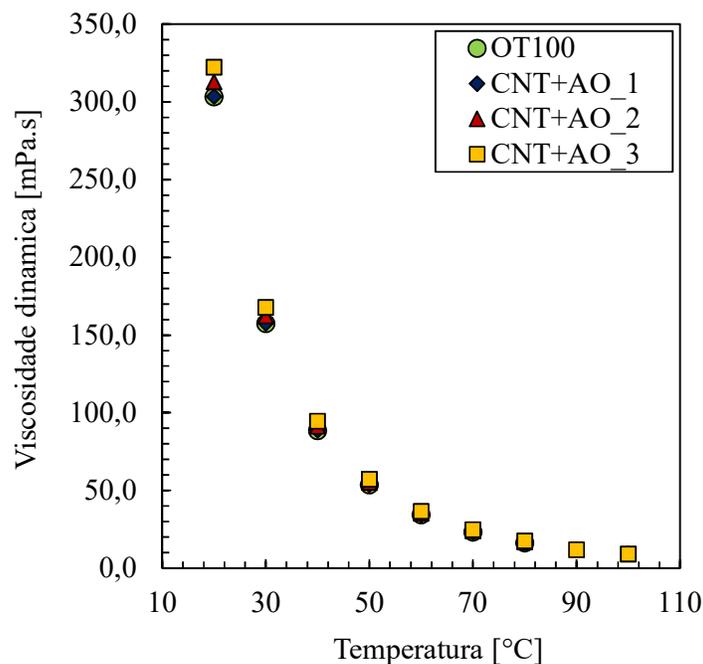


Figura 4.20 Viscosidade dinâmica de nanofluidos CNT+AO em função da temperatura

Com o intuito de verificar os aumentos devidos ao incremento na concentração sólida de partículas, a Fig.4.21 apresenta os resultados de viscosidade dinâmica relativa.

É verificado que os incrementos da viscosidade dinâmica devido à adição de nanopartículas são semelhantes em todas as temperaturas medidas. Os incrementos da viscosidade dinâmica foram, em média, 0,27 %, 2,9 % e 6,2 % para os nanofluidos CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respectivamente.

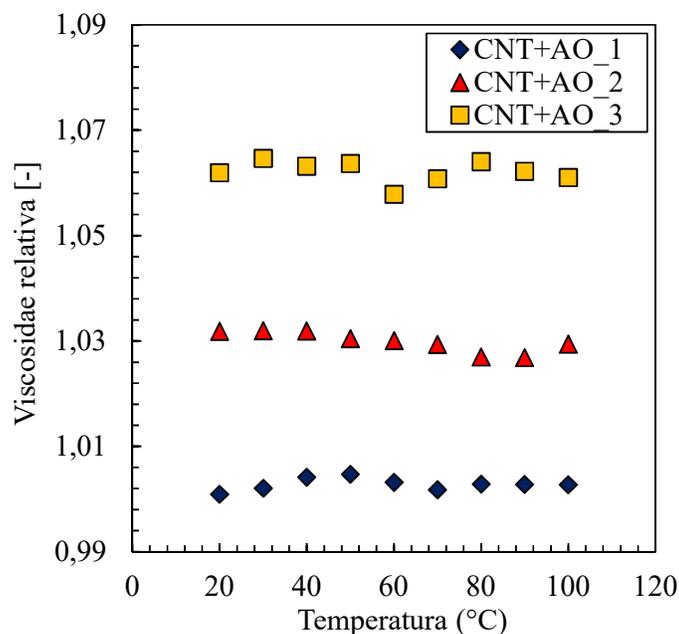


Figura 4.21 Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos CNT+AO em função da temperatura

4.2.4.3 Comparação dos resultados experimentais com modelos teóricos da literatura

Como já foi mencionado anteriormente no capítulo de revisão bibliográfica, existem distintos modelos teóricos utilizados comumente para a determinação da viscosidade relativa de nanofluidos. Nesse sentido, com o propósito de comparar os resultados experimentais das medições de viscosidade dinâmica com modelos teóricos da literatura, foram selecionados três modelos teóricos amplamente utilizados e comparados com os resultados experimentais das medições para uma condição de temperatura específica.

A Fig.4.22 apresenta os valores de viscosidade relativa calculados teoricamente e medidos experimentalmente para os dois grupos de nanofluidos (CNT e CNT+AO)

em função da concentração de nanopartículas à temperatura de 60 °C. É observado que o modelo teórico de Wang (1999) descreve melhor o comportamento da viscosidade relativa dos nanofluidos CNT quando comparados com os outros modelos teóricos mostrados. Além disso foi verificado que os modelos de Einstein (1906) e Brinkman (1952) mostraram subestimar a viscosidade dos nanofluidos produzidos neste trabalho na condição de comparação estabelecida ($T=60\text{ °C}$).

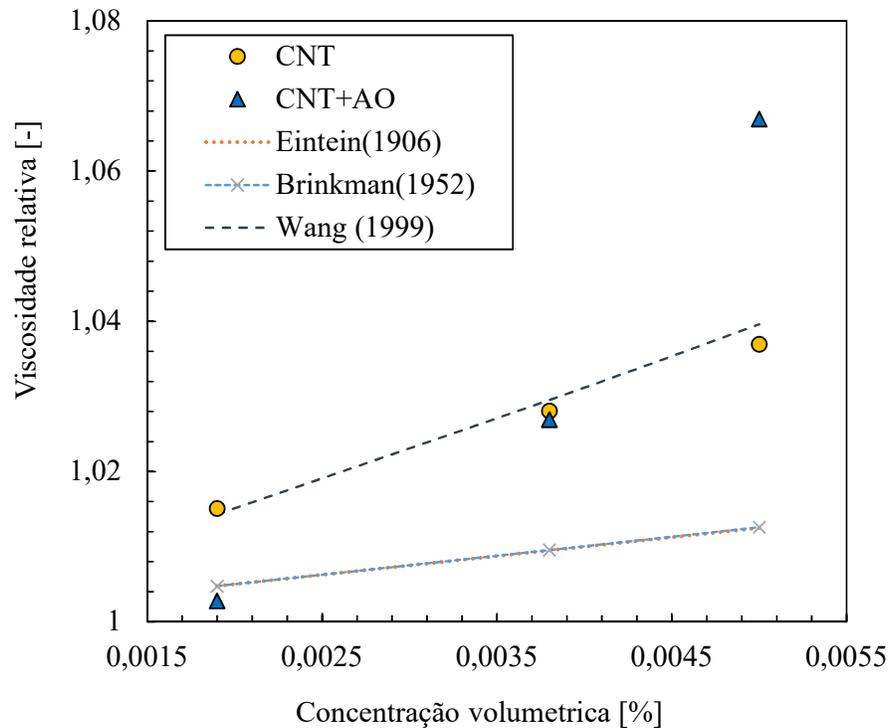


Figura 4.22 Valores de viscosidade relativa teórica e experimental dos nanofluidos em função da concentração volumétrica de partículas à temperatura de 60 °C

4.3 Transferência de calor por convecção forçada interna dos nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo

Uma vez que foi validada a bancada experimental, as características da transferência de calor de nanofluidos a base de óleo são investigadas experimentalmente para as condições de regime de escoamento laminar e sob fluxo de calor constante.

Os experimentos foram realizados conforme as condições operacionais descritas na Tab.4.1, e os dados necessários para a determinação do coeficiente de transferência de calor e queda de pressão dos nanofluidos produzidos foram adquiridos.

Tabela 4.1 Parâmetros operacionais

Fluido	T_{entrada} [°C]	q'' [W/m ²]	\dot{m} [g/s]	Regime
Nanofluidos de nanotubos de carbono (MWCNT) a base de óleo	55	~8000	7	Laminar
	60		12	
	65		17	

Fonte: Autor

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes à avaliação experimental do coeficiente médio de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluidos produzidos neste trabalho nas diferentes condições estabelecidas. Em seguida, uma análise na região de entrada térmica é apresentada e o número de Nusselt local nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste é determinado para os nanofluidos CNT e CNT+AO e comparado com o fluido base.

4.3.1 Coeficiente médio de transferência de calor por convecção

4.3.1.1 Nanofluidos CNT

Na Fig.4.23 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente médio de transferência de calor por convecção h_m [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$] em função da velocidade mássica G [kg/sm^2] e o número de Reynolds para os nanofluidos CNT nas diferentes temperaturas de entrada ($55 \text{ } ^\circ C$, $60 \text{ } ^\circ C$ e $65 \text{ } ^\circ C$).

As Fig.4.23(a) e Fig.4.23(b) apresentam os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor em regime laminar, na condição de temperatura de $55 \text{ } ^\circ C$ na entrada da seção de teste, em função do número de Reynolds (a) e velocidade mássica (b), para as amostras de nanofluidos CNT. Os aumentos para esta condição foram em média de 1,47 %, 5,55 % e 9,36 % para os nanofluidos CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respetivamente, quando comparados com o fluido base.

As Fig. 4.23(c) e Fig.4.23(d) mostram os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor na condição de temperatura de $60 \text{ } ^\circ C$ na entrada da seção de teste, em função do número de Reynolds (c) e velocidade mássica (d) para as amostras de nanofluido CNT. Os aumentos no coeficiente de transferência de calor foram em média de 1,2 %, 5,92 % e 10,14 % para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respectivamente, quando comparados com o fluido base.

As Fig. 4.2(e) e Fig.4.23(f) mostram os resultados experimentais do coeficiente médio de transferência de calor com a condição de temperatura de $65 \text{ } ^\circ C$ na entrada da seção de teste, em função do número de Reynolds (e) e velocidade mássica (f), para as amostras de nanofluidos CNT. Os incrementos no coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos comparados com os valores medidos para o fluido base, foram, em média, 1,91 %, 6,11 % e 10,04 % dos nanofluidos CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respectivamente.

Na Fig.4.23 foi observado que tanto no óleo base, quanto nos nanofluidos, houve um aumento no coeficiente médio de transferência de calor com o incremento da temperatura para uma mesma velocidade mássica.

Cabe ressaltar que os resultados apresentados na Fig.4.23, do coeficiente de transferência de calor para cada caso específico não são obtidos exatamente com os mesmos números de Reynolds. Isso pode ser atribuído ao fato de que a viscosidade dos

nanofluidos produzidos é dependente da temperatura do fluido e da concentração de nanopartículas, como pode ser observado nas Fig. 4.18 e Fig.4.20.

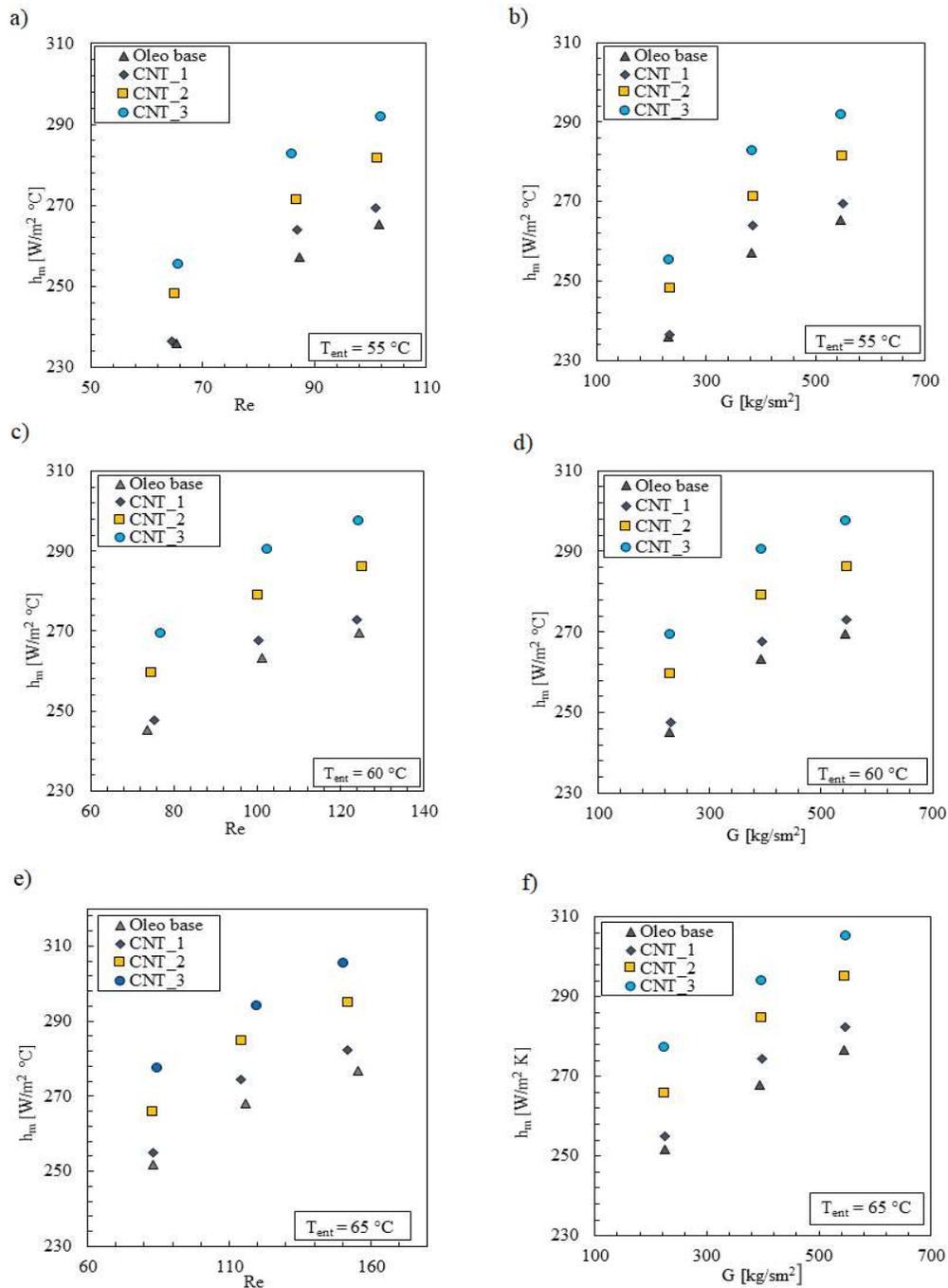


Figura 4.23 Resultados experimentais do coeficiente médio transferência de calor amostras de nanofluidos CNT em função do número de Reynolds e Velocidade mássica.

Na Fig.4.24, são apresentados os resultados experimentais do coeficiente médio de transferência de calor por convecção em função do número de Reynolds dos nanofluidos CNT e o fluido base em todas as condições testadas. Foi observado uma tendência de aumento do coeficiente médio de transferência de calor com o incremento do número de Reynolds. Desse modo, o maior coeficiente médio de transferência de calor foi observado com o maior número de Reynolds. Este comportamento também foi evidenciado por outros autores na literatura como (RAZI et al., 2011).

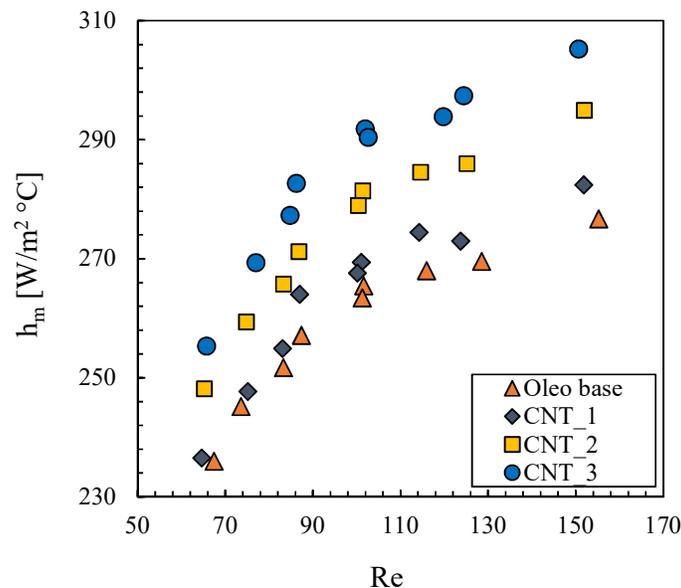


Figura 4.24 Coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds dos nanofluidos de CNT a base de óleo

Os resultados experimentais obtidos mostraram um aumento no coeficiente de transferência de calor com o incremento da concentração de nanopartículas. Esses incrementos podem estar associados aos aumentos obtidos na condutividade térmica dos nanofluidos, como foi descrito por (AMIRI et al., 2015), confirmando a existência de uma relação direta entre o aumento na condutividade térmica e o incremento no coeficiente de transferência de calor. Outros autores como (ARAVIND et al., 2011) e (SHANBEDI et al., 2014) também constataram que com a adição de nanotubos de carbono em fluidos base, a condutividade térmica, bem como o coeficiente de transferência de calor aumentam.

4.3.1.2 - Nanofluidos CNT+AO

Na Fig.4.25 são apresentados os resultados experimentais do coeficiente médio de transferência de calor por convecção h_m [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$] em função da velocidade mássica G [kg/sm^2] e o número de Reynolds para os nanofluidos CNT+AO nas diferentes temperaturas de entrada ($55 \text{ } ^\circ C$, $60 \text{ } ^\circ C$ e $65 \text{ } ^\circ C$).

A Fig.4.25 (a) e Fig.4.25 (b) apresentam os resultados experimentais do coeficiente de transferencia de calor médio em função do número de Reynolds (a) e velocidade mássica G (b), respetivamente, na temperatura de entrada de $55 \text{ } ^\circ C$. Pode ser observado que existe um aumento no coeficiente de transferência de calor com o incremento da concentração sólida de partículas. Na condição de temperatura de $55 \text{ } ^\circ C$, os incrementos do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos de CNT+AO foram em média de 1,33 %, 4,13 % e 6,70 % para os CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respetivamente.

A Fig.4.25 (c) e a Fig.4.25(d) apresentaram os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds e vazão mássica G , respetivamente, na condição de temperatura de $60 \text{ } ^\circ C$. Os incrementos do coeficiente de transferência de calor das amostras de CNT+AO quando comparado com o do fluido base foram em média 1,45 %, 4,32 % e 6,87 % para as amostras CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respetivamente.

Nas Fig.4.25 (e) e Fig.4.25 (f) apresentam-se os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor em função do Número de Reynolds e vazão mássica G , respetivamente, na condição de temperatura de entrada de $65 \text{ } ^\circ C$. Os aumentos do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos comparado com o fluido base foram em média de 1,76 %, 4,50 % e 7,08 % para os CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respetivamente.

De acordo com os resultados apresentados na Fig.4.25, foi observado que o coeficiente médio de transferência de calor aumenta com o incremento da concentração de nanopartículas. No entanto, os incrementos apresentados do coeficiente médio de

transferência de calor dos nanofluidos CNT+AO quando comparados com o fluido base, mostraram ser menores que os apresentados pelos nanofluidos de CNT.

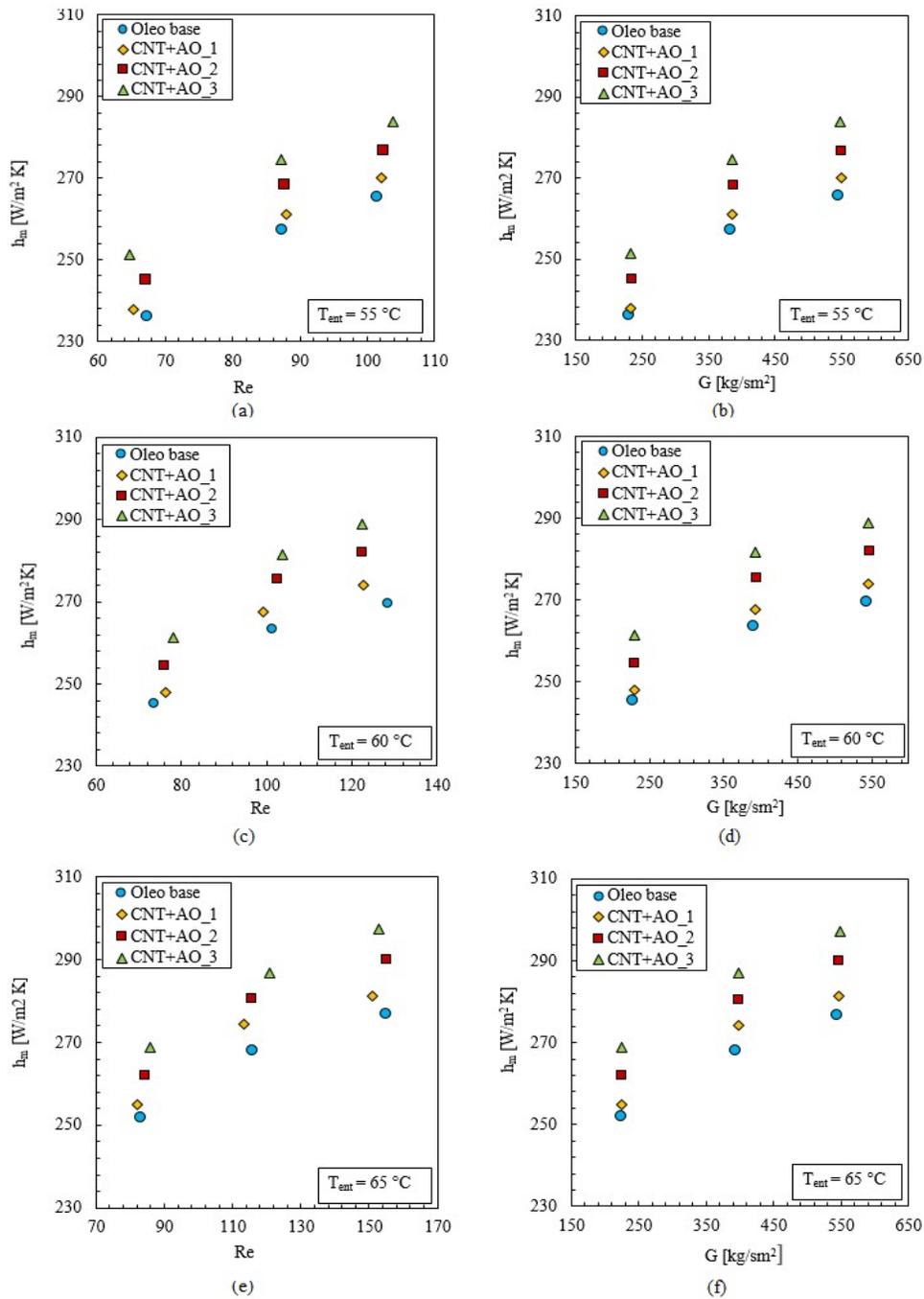


Figura 4.25 Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos CNT+AO

Na Fig.4.26 é apresentada a variação do coeficiente médio de transferência de calor com o número de Reynolds para o fluido base e os nanofluidos CNT+AO. É observado que com o aumento de número de Reynolds, o coeficiente médio de transferência de calor incrementou para o fluido base e as amostras de nanofluidos. Nesse sentido, os nanofluidos de CNT+AO, apresentaram uma maior transferência de calor com o maior número de Reynolds. Este comportamento está de acordo com os resultados experimentais sobre transferência de calor de nanofluidos a base de óleo, publicados por outros estudos na literatura como (RAZI et al., 2011) (KOWSARY et al., 2012).

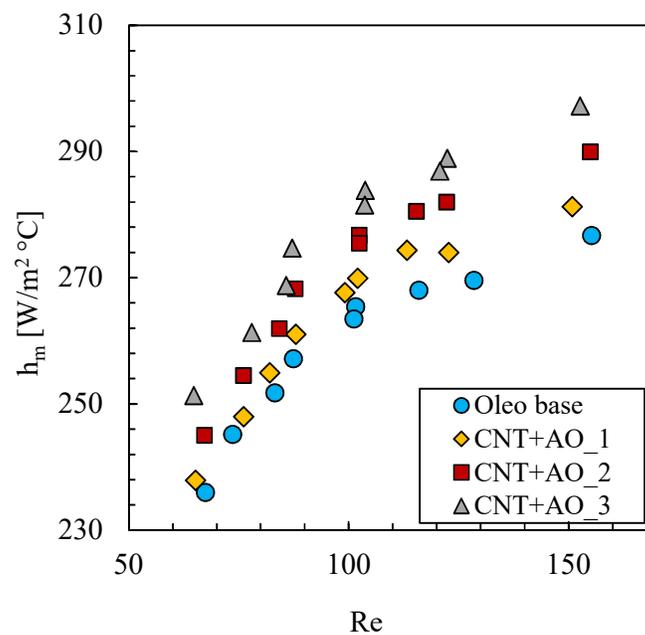


Figura 4.26 Variação do coeficiente médio de transferência de calor com o número de Reynolds para o óleo base e nanofluidos CNT+AO

4.3.2 Análise local do coeficiente de transferência de calor ao longo da seção de teste

Como já foi mencionado anteriormente, foi verificado que, para as condições estabelecidas dos experimentos neste trabalho, o escoamento encontra-se em regime laminar, na região termicamente em desenvolvimento. Nesse sentido, uma análise local foi realizada para obter uma visão mais detalhada do comportamento térmico dos nanofluidos e o fluido base ao longo da seção de teste.

O coeficiente local de transferência de calor ao longo da seção de teste foi investigado experimentalmente. Inicialmente, o estudo compreendeu uma análise no comportamento do coeficiente de transferência de calor do fluido base em função do número de Reynolds e da posição axial na seção de teste. Posteriormente são apresentados os resultados experimentais do número de Nusselt local nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste para os nanofluidos produzidos e o fluido base.

Na Fig.4.27 é apresentado o coeficiente local de transferência de calor em diferentes posições axiais ao longo do tubo da seção de teste para cada um dos números de Reynolds dos experimentos. Pode ser observada uma diminuição não linear do coeficiente de transferência de calor com o aumento da distância axial desde a entrada da seção de teste. Desse modo, o maior coeficiente de transferência de calor foi observado na entrada para o óleo puro. Além disso, pode ser observado que com o aumento do número de Reynolds, o coeficiente de transferência de calor aumenta em cada uma das posições axiais ao longo da seção de teste para o fluido base. Este comportamento é próprio dos escoamentos em regime laminar que se encontram na região de entrada térmica e mostra boa concordância com resultados da literatura como (AMIRI et al., 2015)(REA et al., 2009).

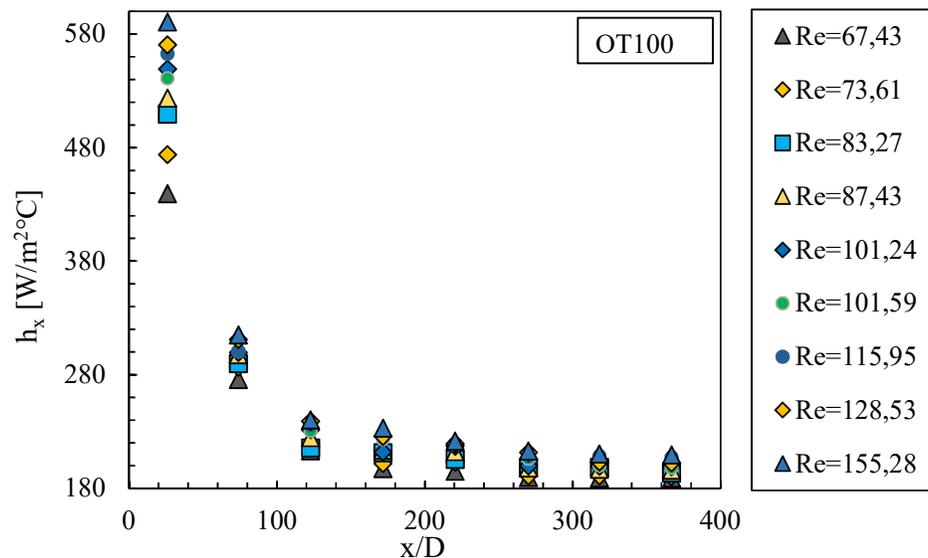


Figura 4.27 Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial para cada número de Reynolds.

Na Fig.4.28 é comparado o número de Nusselt local da correlação de Seider e Tate (1936) com o número de Nusselt local experimental, para os números de Reynolds de 70 ± 10 (a) e 130 ± 10 (b), nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste. O desvio médio do número de Nusselt local experimental quando comparado com o número de Nusselt local do modelo teórico adotado foi de 3,83 % e 5,37 %, para $Re = 70 \pm 10$ e $Re = 130 \pm 10$, respectivamente. Portanto, os números de Nusselt previstos pela correlação estão em bom acordo com os dados experimentais.

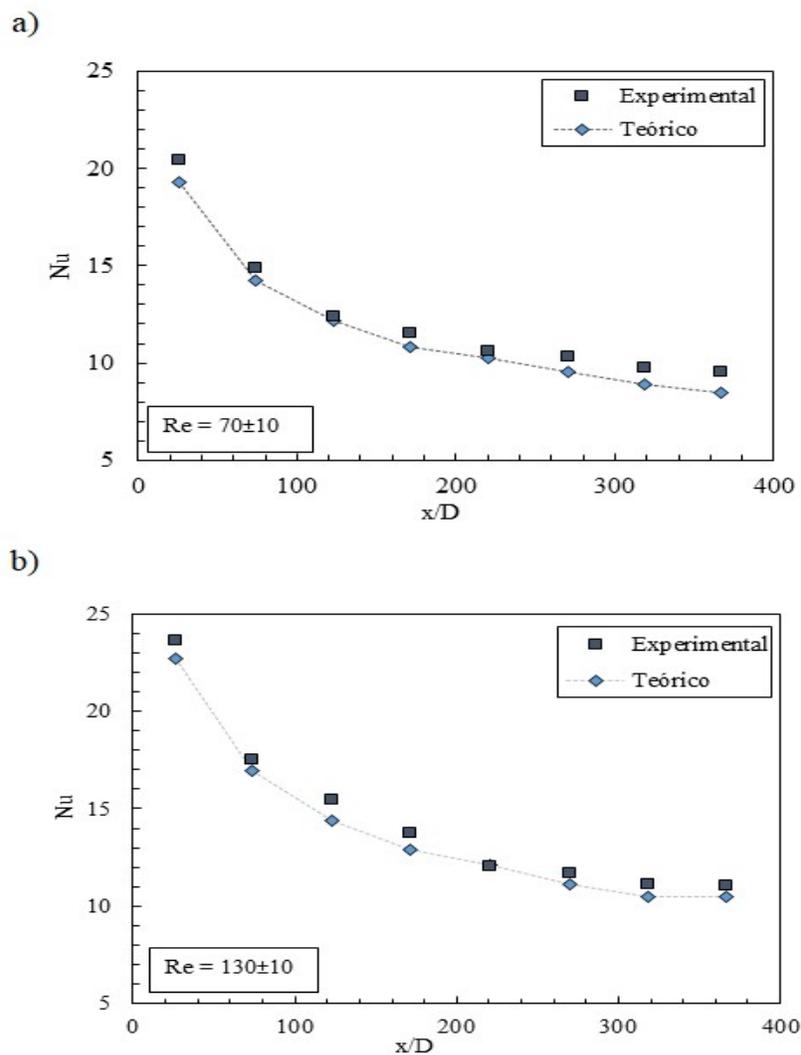


Figura 4.28 Nusselt local teórico e experimental ao longo da seção de teste, para um $Re=70 \pm 10$ (a), e $Re=130 \pm 10$ (b)

Nas Fig. 4.29a e Fig. 4.29b são apresentados os resultados do número de Nusselt local para fluido base e os nanofluidos CNT (a) e CNT+AO (b) nas diferentes posições axiais (x/D) ao longo da seção de teste para um número de Reynolds de 70 ± 10 .

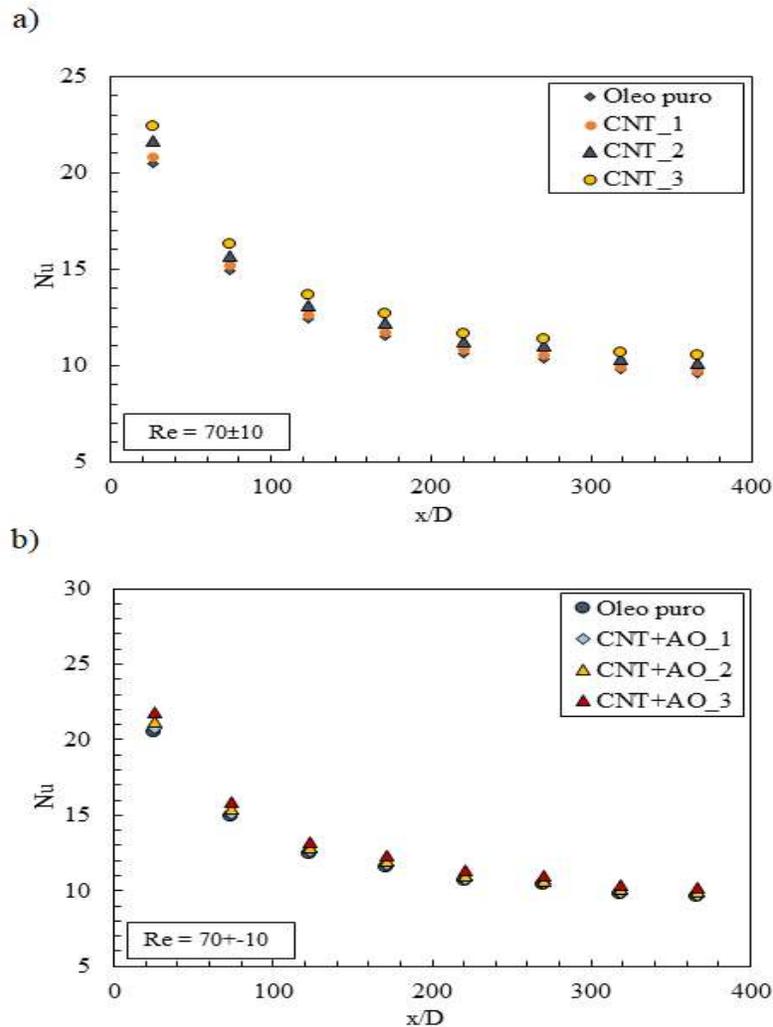


Figura 4.29 Número de Nusselt dos nanofluidos CNT (a) e CNT+AO (b), ao longo da seção de teste, para um $Re=70 \pm 10$

Pode ser observado que o número de Nusselt aumenta com o incremento da concentração de nanopartículas em todas as posições axiais ao longo da seção de teste para os dois grupos de nanofluidos CNT e CNT+AO. Além disso, pode ser observado que, o número de Nusselt diminui com o incremento da distância axial para os nanofluidos, como também foi observado para o fluido base. Nesse sentido, é verificado que o maior número de Nusselt é observado na entrada da seção de teste ($x/D=25,98$)

tanto para as amostras de CNT e CNT+AO quanto para o fluido base. Este comportamento também foi relatado por outros autores como Abreu et al. (2014) para nanofluidos de MWCNT sobre condições de escoamento laminar.

Na Fig. 4.30a são apresentados os aumentos relativos do número de Nusselt obtidos para o nanofluido CNT na condição de número de $Re = 70 \pm 10$ nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste. Os aumentos observados para os nanofluidos CNT_1 foram de 1,95 % e 1,84 %, na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente. Nessa mesma condição, os incrementos mostrados para o nanofluido CNT_2 foram de 6,07 % e 5,68 %, na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente. O nanofluido de maior concentração de nanotubos de carbono CNT_3, apresentou 9,51 % e 10,14 % de aumento na transferência de calor na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente.

Na Fig.4.30 pode ser observado o incremento no número de Nusselt obtido para os nanofluidos de CNT+AO, na condição de $Re=70 \pm 10$, nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste comparado ao fluido base. Para o nanofluido de menor concentração CNT+AO_1, os aumentos na transferência de calor obtidos na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), foram de 1,27 % e 1,31 %, respectivamente. O nanofluido CNT+AO_2, mostrou um aumento na transferência de calor na entrada ($x/D=25,98$) de 3,81 %, e na saída ($x/D=366,92$) de 3,47 %. Para a maior concentração deste grupo de nanofluidos, CNT+AO_3, os aumentos obtidos na transferência de calor foram de 6,75 % e 6,72 % na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente.

De acordo com os resultados experimentais mencionados anteriormente, foi observado que as amostras de nanofluidos CNT e CNT+AO, na condição de $Re=70 \pm 10$, mostraram um incremento no número de Nusselt local em todas as posições axiais ao longo da seção de teste com o aumento da concentração de nanopartículas. As amostras de CNT apresentaram maiores incrementos no número de Nusselt local quando comparados com os incrementos observados nas amostras CNT+AO na mesma concentração de nanopartículas. Este comportamento pode ser atribuído aos incrementos na condutividade térmica obtidos nas amostras de nanofluidos CNT. Por outro lado, não foi observado uma variação significativa dos incrementos no número de Nusselt com o aumento da distância axial para os nanofluidos CNT e CNT+AO.

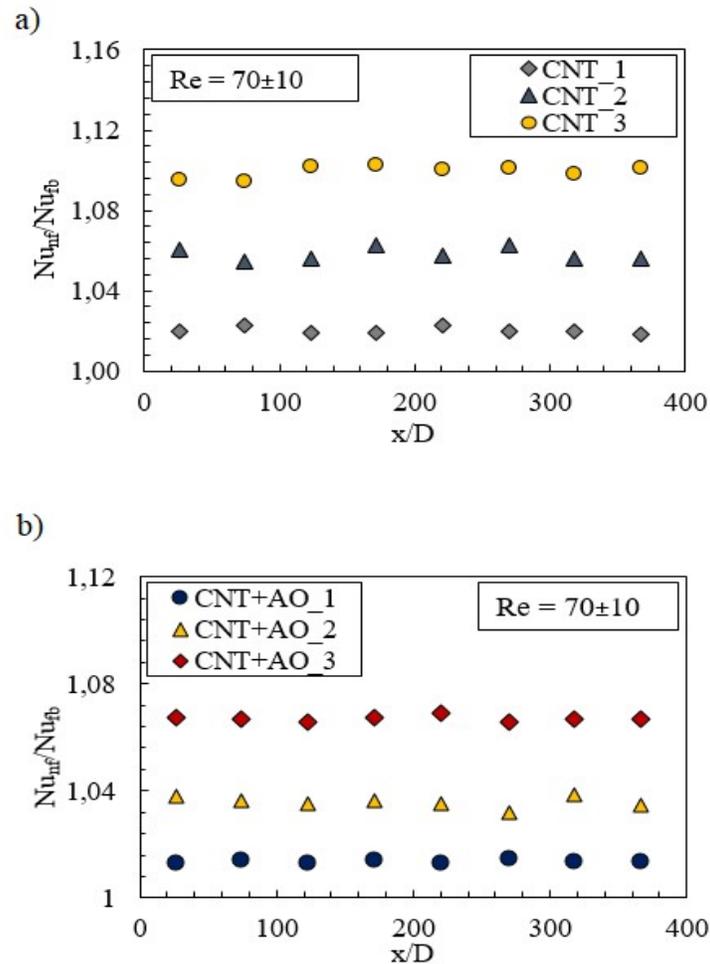


Figura 4.30 Variação do aumento do número de Nusselt do fluido base e nanofluidos de (a)CNT e (b)CNT+AO ao longo da posição axial para $Re=70 \pm 10$

Na Fig.4.31 são apresentados os resultados experimentais do número de Nusselt para os nanofluidos CNT (a) e CNT+AO (b), nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste, para um $Re=130 \pm 10$.

Na Fig.4.31 é observado que a transferência de calor aumenta com o incremento da concentração de nanotubos de carbono CNT em todas as posições axiais ao longo da seção de teste para um número de $Re=130 \pm 10$. Além disso, pode ser observado um comportamento decrescente e não linear ao longo da seção de teste. O mesmo comportamento pode ser visto na Fig.4.31(b) para os nanofluidos de CNT+AO.

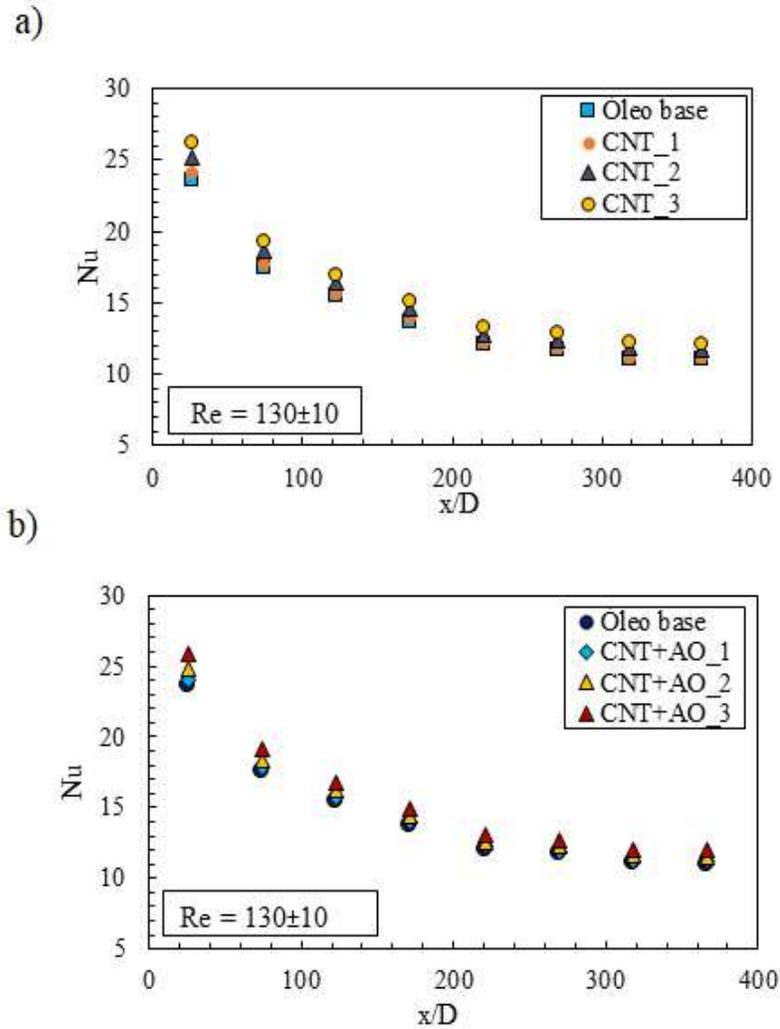


Figura 4.31 Número de Nusselt do fluido base e nanofluidos CNT(a) e (b) ao longo da seção de teste, para $Re=130 \pm 10$

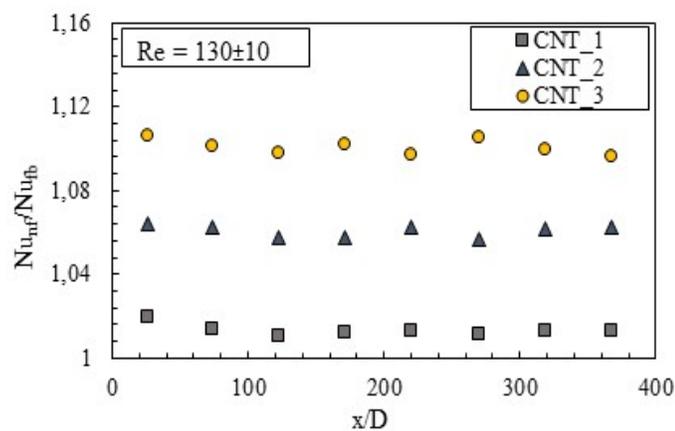
Na Fig.4.32 é apresentada a variação dos aumentos na transferência de calor dos nanofluidos CNT (a) e CNT+AO (b) comparado com fluido base, ao longo da seção de teste, para um número de $Re=130 \pm 10$.

Para o nanofluido CNT_1, pode ser observado que o aumento na transferência de calor na entrada ($x/D=25,98$) foi de 1,95 % e na saída ($x/D=366,92$) foi de 1,32 %. Para o nanofluido CNT_2, o aumento de transferência de calor na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$) foram de 6,38 % e 6,25 %, respectivamente. Os nanofluidos

CNT_3, apresentaram aumento na transferência de calor de 10,61 % e 9,68 %, na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente.

Na Fig.4.32(b), para a menor concentração de nanotubos de carbono revestidos com ácido oleico, CNT+AO_1, o aumento na transferência de calor na região de entrada ($x/D=25,98$) e saída ($x/D=366,92$), foi de 1,61 % e 1,52 %, respectivamente. Assim, para o CNT+AO_2, o incremento na transferência de calor na região de entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), foi de 4,69 % e 4,24 %, respectivamente. Para os nanofluidos CNT+AO_3, o aumento na transferência de calor foi de 9,34 % e 8,75 % na entrada ($x/D=25,98$) e na saída ($x/D=366,92$), respectivamente.

a)



b)

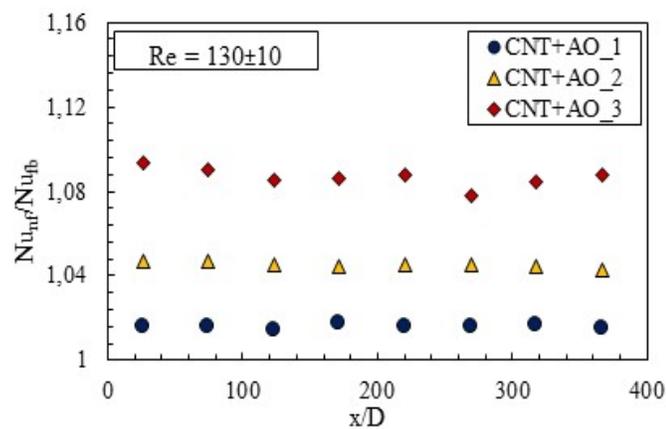


Figura 4.32 Variação do aumento do número de Nusselt ao longo da seção de teste, para um $Re=130 \pm 10$

Apesar dos leves incrementos apresentados na transferência de calor, os resultados experimentais sugerem um maior aprimoramento do número de Nusselt do que o observado para a condutividade térmica dos nanofluidos com maior concentração, CNT_3 e CNT+AO_3, onde foram mais evidentes as diferenças. Tal comportamento sugere que a transferência de calor dos nanofluidos pode ser governada por outros mecanismos além da condutividade térmica. Resultados semelhantes, porém, com maiores incrementos, foram obtidos por outros pesquisadores como Xuan e Li (2003), que relataram aumentos do coeficiente de transferência de calor de 60 % e 12,5 % para a condutividade térmica. Wen e Ding (2004) relataram aumentos do coeficiente de transferência de calor de 47 %, e 10 % de aumento na condutividade térmica.

4.4 Queda de pressão e fator de atrito dos nanofluidos

Os resultados realizados com óleo puro e etilenoglicol apresentados no capítulo anterior (Cap.3, Seção 3.6.3), incluíram comparações com o modelo teórico adotado para o coeficiente de atrito, comprovando a confiabilidade do equipamento experimental. Dessa maneira, a nova bateria de testes, conforme a Tabela 4.1, foi realizada e os resultados adquiridos serão utilizados para as devidas comparações de queda de pressão e fator de atrito das amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo. Cabe ressaltar que os ensaios fluidodinâmicos foram realizados simultaneamente com os ensaios térmicos.

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais do fator de atrito e queda de pressão dos nanofluidos CNT e CNT+AO.

4.4.1 Nanofluidos CNT

A Fig.4.33(a) apresenta os resultados para o fator de atrito em função do número de Reynolds para as amostras de CNT e o óleo base. Desta maneira, os resultados experimentais ilustrados em regime laminar mostram um desvio médio de 21,35 % com o modelo teórico. O fator de atrito apresenta um comportamento decrescente com o incremento do número de Reynolds para todos os nanofluidos de CNT. Este comportamento também foi observado por outros autores da literatura como (LEE; MUDAWAR, 2007)

Na Fig.4.33(b) podem ser observados os resultados experimentais para a queda de pressão na seção de teste, em função da velocidade mássica G , para as amostras de nanofluidos CNT. Os incrementos na queda de pressão apresentados foram em média de 1,25 %, 2,14 % e 4,23% para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3, respectivamente.

Também é possível observar os efeitos gerados pela variação da temperatura de entrada na queda de pressão dos nanofluidos. Foi verificado que a queda de pressão é sensível às mudanças de temperatura.

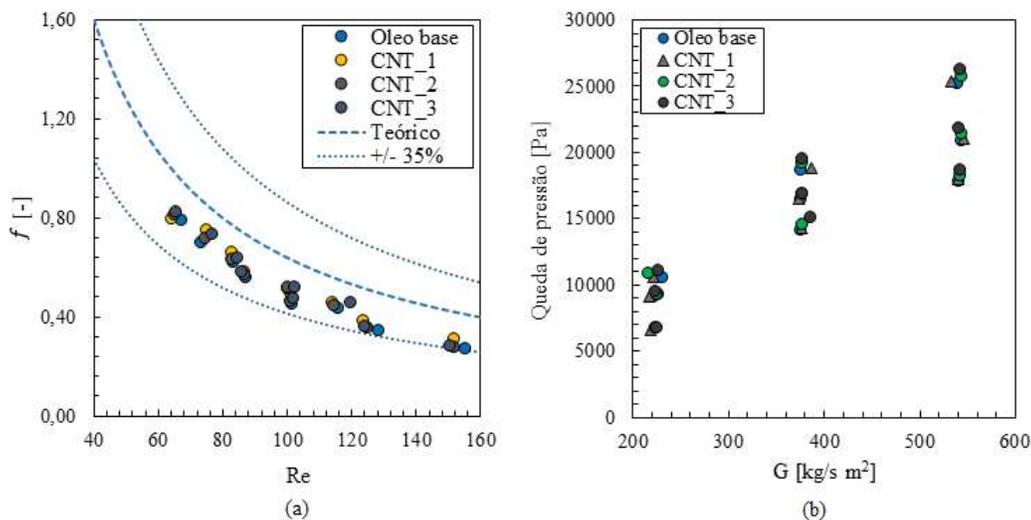


Figura 4.33 Queda de pressão e fator de atrito das amostras de CNT. (a) f vs Re ; (b) ΔP vs G

De acordo com os resultados experimentais apresentados anteriormente na Fig. 4.33 do fator de atrito e queda de pressão dos nanofluidos CNT, é observado que com o incremento da concentração de nanopartículas no fluido base, a queda de pressão aumenta. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento na viscosidade dos nanofluidos produzidos com o incremento da concentração de nanopartículas, causando um incremento da queda de pressão dos nanofluidos. Outros autores também mostraram em seus estudos este comportamento da queda de pressão em função da velocidade mássica G , por exemplo, Cárdenas (2019), apresentando comportamentos similares para nanofluidos a base de óleo.

4.4.2 Nanofluidos CNT+AO

Na Fig.4.34(a) são apresentados os resultados experimentais do fator de atrito em função do Número de Reynolds para as amostras de nanofluidos de CNT+AO comparados com o modelo teórico para o regime laminar. Todas as amostras de nanofluido apresentaram um desvio médio com o modelo teórico de 20,89%.

Na Fig. 4.34(b) são observados os resultados experimentais da queda de pressão na seção de teste, em função da velocidade mássica para as amostras de nanofluidos de CNT+AO. A queda de pressão para os nanofluidos de CNT+AO, apresentaram leves incrementos quando comparada à do fluido base. Os aumentos foram em média de 1,28 %, 2,97 % e 4,06 %, para os CNT+AO_1, CNT+AO_2 e CNT+AO_3, respectivamente.

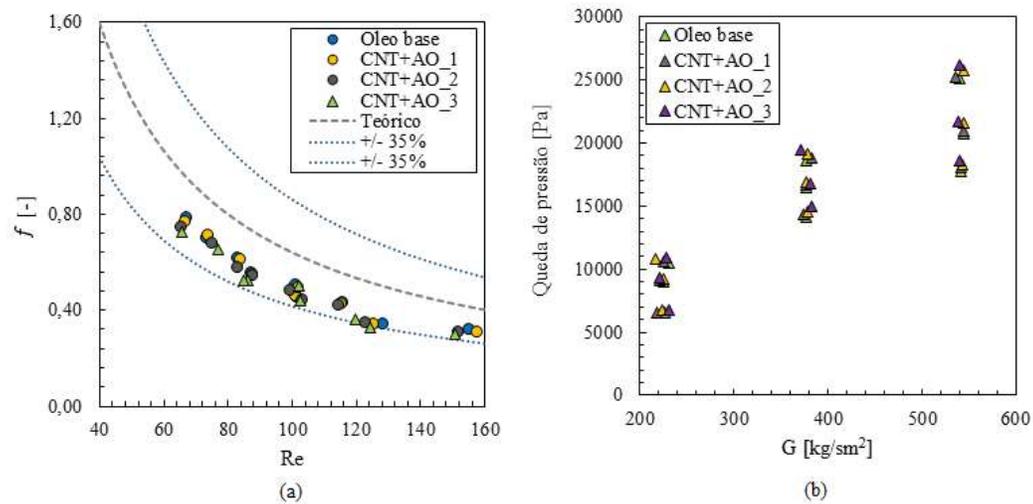


Figura 4.34 Fator de atrito e queda de pressão dos nanofluidos de CNT+AO. (a) f vs Re ; (b) ΔP vs G

De acordo com os resultados experimentais da queda de pressão na seção de teste das amostras de nanofluido CNT+AO, é possível observar que há um comportamento semelhante ao dos nanofluidos de CNT, dado que não foram observados incrementos significativos na queda de pressão quando comparado ao fluido base.

4.5 Desempenho termo-hidraulico dos nanofluidos

Para analisar o desempenho termo-hidráulico de todas as amostras de nanofluidos testados, foi estabelecida uma comparação gráfica do coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa descrita no trabalho de Cárdenas (2019). Dessa maneira a potência de bombeamento consumida na seção de teste foi calculada por meio da Eq. 4.3 para as amostras de nanofluidos de este trabalho, assim como para o fluido base nas mesmas condições nominais.

$$\dot{W}_B = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \quad (4.3)$$

Os resultados obtidos para os nanofluidos CNT e CNT+AO são mostrados nas Fig. 4.35 e Fig.4.36, respetivamente. Nas figuras pode ser observado que existem quatro quadrantes que poderiam descrever o desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos, sendo “m” o coeficiente relativo de transferência de calor e “n” a potência de bombeamento relativa em coordenadas vetoriais, onde a coordenada (1,1) representa o fluido base utilizado (OT100).

O primeiro quadrante (esquerda superior) representa o resultado desejado ($m > 1$, $n < 1$), descrevendo um desempenho termo-hidráulico onde existe um incremento no coeficiente de transferência de calor por convecção e um decremento na potência de bombeamento; o segundo quadrante (direita superior), representa o resultado teoricamente esperado dos nanofluidos onde se tem acréscimos tanto no coeficiente de transferência de calor por convecção quanto na potência de bombeamento ($m > 1$, $n > 1$); o terceiro quadrante (direita inferior) indica que a aplicação de nanofluidos não apresenta nenhuma vantagem, já que esse quadrante representa valores na potência de bombeamento superiores aos do fluido base e coeficientes de transferência de calor inferiores ao do fluido base ($m < 1$, $n > 1$); finalmente o quarto quadrante representa uma redução no coeficiente de transferência de calor por convecção e também na potência de bombeamento ($m < 1$, $n < 1$).

Dessa maneira, segundo o critério descrito, na Fig.4.35 podem ser observados os resultados de desempenho termo-hidráulico para as amostras de nanofluidos CNT. Os nanofluidos ficaram no segundo quadrante. Os maiores incrementos no coeficiente de transferência de calor foram obtidos para os nanofluidos CNT_3. Os aumentos em

transferência de calor dos nanofluidos CNT foram em média de 1,54 %, 5,87 % e 9,89 % para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3. Por outro lado, os incrementos na potência de bombeamento foram em média de 1,37 %, 2,64 % e 4,56 % para os CNT_1, CNT_2 e CNT_3.

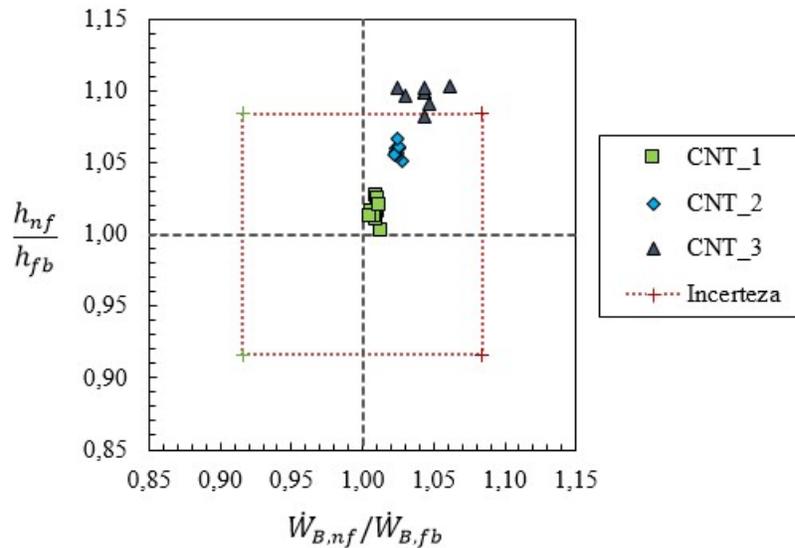


Figura 4.35 Desempenho termo-hidráulico de nanofluidos CNT

Portanto, adotando o critério estabelecido para quantificar a potencialidade de aplicação dos nanofluidos a base de óleo produzidos neste trabalho, a amostra de maior concentração, CNT_3, apresentou o melhor desempenho termo-hidráulico, pois obteve incrementos próximos a 10 % no coeficiente de transferência de calor quando comparado com o fluido base.

Seguindo a metodologia descrita anteriormente, na Fig.4.36 são apresentados os resultados de comparação de aumentos no coeficiente de transferência de calor e incrementos na potência de bombeamento dos nanofluidos CNT+AO para descrever o desempenho termo-hidráulico. Os resultados mostraram um comportamento teoricamente esperado com um incremento no qual é observado o efeito da adição de nanopartículas no aumento do coeficiente de transferência de calor e potência de bombeamento. No entanto, os resultados não se mostraram satisfatórios para esses nanofluidos, devido aos leves incrementos no coeficiente de transferência de calor e os aumentos obtidos em potência de bombeamento.

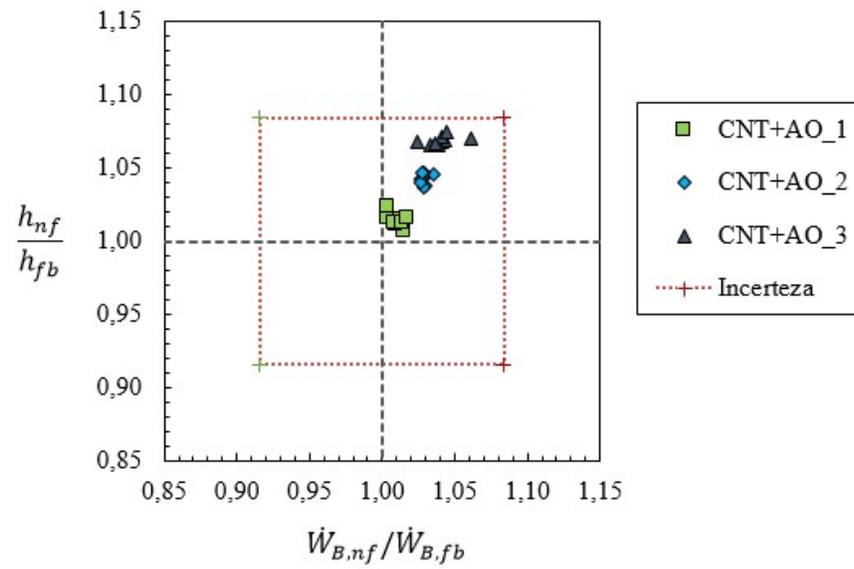


Figura 4.36 Desempenho termohidráulico de nanofluidos CNT+AO

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho teve como foco principal a avaliação de desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de óleo. Nesse sentido, iniciou-se com uma revisão bibliográfica, que abordou os assuntos relacionados aos processos de síntese, estabilidade de nanofluidos, caracterização das propriedades termofísicas e avaliação térmica e fluidodinâmica. Foi realizada uma análise de estabilidade dos nanofluidos produzidos empregando métodos qualitativos e quantitativos. Na sequência, as propriedades termofísicas como condutividade térmica, viscosidade e massa específica foram medidas experimentalmente. Foram realizadas algumas modificações na bancada experimental que permitiram atingir as condições desejadas dos experimentos. Por conseguinte, um grande número de dados experimentais foi obtido possibilitando a realização de diversas análises em termos de transferência de calor e queda de pressão.

Este trabalho contribui para o levantamento de dados experimentais e para um maior entendimento sobre os mecanismos e parâmetros envolvidos na estabilidade, a transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos a base de óleo.

A seguir, serão apresentadas as conclusões finais referentes aos resultados obtidos durante o desenvolvimento da presente pesquisa e, posteriormente, recomendações para trabalhos futuros são apresentados.

5.1 Conclusões

As principais conclusões referentes à presente pesquisa podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

- Os resultados obtidos da análise de estabilidade dos nanofluidos pelo método de espectrofotometria UV-VIS se mostraram concordantes com o comportamento observado pela análise visual.

- Os resultados experimentais da condutividade térmica apresentaram um aumento dessa propriedade com o incremento da concentração de nanopartículas nas temperaturas medidas;
- A viscosidade dos nanofluidos se mostrou dependente da concentração de nanopartículas e da temperatura. Foi observado que a viscosidade aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas e diminuiu com o aumento da temperatura;
- Os resultados experimentais do coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos produzidos, mostraram um aumento com o incremento tanto da concentração de nanopartículas quanto do número de Reynolds. Os maiores incrementos observados foram em média 9,85 % e 6,88 % para os nanofluidos CNT_3 e CNT+AO_3, respectivamente;
- Os resultados experimentais obtidos do número de Nusselt local, para os nanofluidos e fluido base em diferentes posições axiais ao longo da seção de teste, mostraram um comportamento decrescente e não linear com o incremento da distância axial desde a entrada. Além disso, o número de Nusselt local dos nanofluidos nas diferentes posições axiais ao longo da seção de teste aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas comparado ao fluido base nas diferentes posições ao longo da seção de teste. O maior número de nusselt foi observado na entrada da seção de teste tanto para os nanofluidos quanto para o fluido base.
- Os resultados experimentais da queda de pressão dos nanofluidos apresentaram um aumento com a adição de nanopartículas no fluido base. Foi observada uma relação direta entre os aumentos relativos da viscosidade e da queda de pressão dos nanofluidos;
- Os resultados obtidos para as amostras dos nanofluidos CNT+AO não se mostraram satisfatórios em termos de desempenho termo-hidráulico. Isto devido a que não foram visualizados incrementos significativos na transferência de calor em relação aos aumentos na potência de bombeamento. Porém, eles apresentaram uma alta estabilidade após 3 meses.

- Os resultados experimentais do nanofluido CNT_3, em termos de desempenho termo-hidráulico foram satisfatórios segundo o critério adotado. Isto devido ao incremento significativo na transferência de calor de 9,85 % e um leve aumento em potência de bombeamento de 4,85 % quando comparado ao fluido base.

5.2 Sugestões

A seguir são apresentadas algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos a fim de contribuir ao entendimento das características de transferência de calor de nanofluidos.

- Estabelecer critérios de produção de nanofluidos, uma vez que, o processo de produção é baseado em informações publicadas na literatura e experiências individuais das diferentes pesquisas realizadas no laboratório;
- Analisar o efeito de parâmetros (potencia, tempo, temperatura) do processo de sonicação de alta frequência nas propriedades termofísicas, o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão dos nanofluidos;
- Realizar uma análise reológica das amostras de nanofluidos produzidas para verificar se estas apresentam características de fluido não newtoniano;
- Realizar ensaios com nanofluidos preparados com outras concentrações de nanotubos de carbono funcionalizados com ácido oleico com o objetivo de ampliar o conhecimento da influência desse tipo de nanopartículas em óleos;
- Analisar o efeito de temperaturas elevadas na estabilidade dos nanofluidos produzidos a base de óleo, tendo em conta que os óleos são principalmente utilizados para aplicações de alta temperatura;

- Avaliar a estabilidade dos nanofluidos produzidos antes e após dos testes experimentais na bancada experimental.

5.3 Considerações finais

Foi relatado os avanços da comunidade científica nos últimos anos e o grande esforço na tentativa de esclarecer os mecanismos físicos associados ao comportamento de transferência de calor e queda de pressão de nanofluidos. Entretanto, dada a diversidade de fatores que influenciam tal comportamento, os resultados apresentados até o presente momento são bastante controversos. Nesse sentido, a presente pesquisa se insere no esforço para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da nanotecnologia aplicada nos sistemas térmicos. A pretensão deste trabalho foi contribuir para ampliação de dados experimentais referentes à transferência de calor por convecção e queda de pressão de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas a base de óleo, e, com isso, colaborar para o melhor entendimento do comportamento térmico e fluidodinâmico dos nanofluidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEROUMAND, S. et al. Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 101, p. 362–372, 2016a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.148>
- ABEROUMAND, S.; JAFARIMOGHADDAM, A. Tungsten (III) oxide (WO₃) – Silver/transformer oil hybrid nanofluid: Preparation, stability, thermal conductivity and dielectric strength. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 1, p. 169–174, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.003>
- ABEROUMAND, S.; JAFARIMOGHADDAM, A. Experimental study on synthesis stability , thermal conductivity and viscosity of Cu – engine oil nanofluid. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 71, p. 315–322, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.035>
- ABREU, B. et al. Experimental characterization of convective heat transfer with MWCNT based nanofluids under laminar flow conditions. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 50, n. 1, p. 65–74, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1226-8>
- AHMADI, M. H. et al. A review of thermal conductivity of various nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 265, n. 2017, p. 181–188, 2018. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.124>
- AKHAVAN-BEHABADI, M. A. et al. Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 4, p. 5-7. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.02.008>
- AKHAVAN-ZANJANI, H. et al. Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of Graphene-water nanofluid inside a circular tube. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 100, p. 316–323, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.003>
- ALAWI, O. A. et al. Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 116, n. October, p. 1314–1325, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.133>
- ALI, N. et al. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. **Journal of Nanomaterials**, .2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6978130>
- AMIRI, A. et al. Laminar convective heat transfer of hexylamine-treated MWCNTs-based turbine oil nanofluid. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 355–367, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.066>
- AMROLLAHI, A. et al. Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 6, p. 717–723, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.003>
- ARAVIND, S. S. J. et al. Investigation of structural stability, dispersion, viscosity, and

conductive heat transfer properties of functionalized carbon nanotube based nanofluids. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, n. 34, p. 16737–16744, 2011. <https://doi.org/10.1021/jp201672p>

ASADI, A. et al. The effect of temperature and solid concentration on dynamic viscosity of MWCNT/MgO (20–80)–SAE50 hybrid nano-lubricant and proposing a new correlation: An experimental study. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.021>

ASADI, A. et al. Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.117, p.474–486, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.036>

ASADI, A. et al. An experimental and theoretical investigation on heat transfer capability of Mg (OH)₂/MWCNT-engine oil hybrid nano-lubricant adopted as a coolant and lubricant fluid. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 577–586, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.014>

ASADI, A. et al. Recent advances in preparation methods and thermophysical properties of oil-based nanofluids: A state-of-the-art review. **Powder Technology**, v. 352, p. 209–226, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.054>

ASADI, A.; POURFATTAH, F. Heat transfer performance of two oil-based nanofluids containing ZnO and MgO nanoparticles; a comparative experimental investigation. **Powder Technology**, v.343, p.296–308, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.023>

ASADI, M.; ASADI, A. Dynamic viscosity of MWCNT / ZnO – engine oil hybrid nanofluid : An experimental investigation and new correlation in different temperatures and solid concentrations ☆. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 41–45, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.019>

ASIRVATHAM, L. G. et al. Convective heat transfer of nanofluids with correlations. **Particuology**, v. 9, n. 6, p.626–631, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2011.03.014>

BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 83, n. 1, p. 97- 117, November 1977. ISSN 0022-1120. <https://doi.org/10.1017/S0022112077001062>

BEHESHTI, A. et al. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 118, n. 3, p. 1451–1460, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4048-0>

BERGMAN, T. L. Effect of reduced specific heats of nanofluids on single phase, laminar internal forced convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 5–6, p. 1240–1244, 2009. ISSN 15882926. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.019>

BERGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. **Colloidal silica: Fundamentals and applications**. 2005.

BOTHA, S. S. et al. Physicochemical properties of oil-based nanofluids containing hybrid structures of silver nanoparticles supported on silica. **Industrial and**

Engineering Chemistry Research, v. 50, n. 6, p. 3071–3077, 2011.
<https://doi.org/10.1021/ie101088x>

BRINKMAN, H. C., (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solution. **Jornal of Chemical Physics**, vol. 20, p. 571–581. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>

CARDENAS, A.O. **Avaliação Experimental da Transferência de Calor e Perda de Pressão de Nanofluidos em escoamento monofásico em dutos**. Universidade federal de uberlândia. Uberlândia, p. 40 - 45. 2019.
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25417>

CARDENAS, E. M. **Avaliação experimental do desempenho termohidráulico de nanofluidos de grafeno em um sistema de arrefecimento automotivo**. Universidade federal de uberlândia. Uberlândia, p 50-55. 2017.
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19838>

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, v. 66, n. January 1995, p. 99–105, 1995.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/196525>

CHOI, S. U. S. et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**, v. 79, n. 14, p. 2252–2254, October 2001. ISSN 0003-6951. <https://doi.org/10.1063/1.1408272>

CHOPKAR, I. et al. Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 39, n. 7, p. 1535–1542, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9444-7>

DA CRUZ SANTOS, J. C. Síntese e caracterização de nanocompósitos PVA/Nanotubos de carbono para potencial aplicação biomédica. 2011.
<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8TFL4N>

DARDAN, E.; AFRAND, M.; ISFAHANI, A. H. M. Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. **Applied Thermal Engineering**, v. 109, p. 524–534, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.103>

DAS, S. K. et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 4, p. 567, 2003.
<https://doi.org/10.1115/1.1571080>

DING, Y. et al. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 1–2, p. 240–250, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009>

EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**, v. 324, n. 2, p. 289–306, 1906. . <https://doi.org/10.1002/andp.19063240204>

ETTEFAGHI, E. O. LLA. et al. Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 46, p. 142–147, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.003>

GARG, P. et al. An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 21–22, p. 5090–5101, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.029>

GHADIMI, A. et al. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 17–18, p. 4051–4068, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014>

GOUDARZI, K. et al. Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 60, p. 20–27, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.07.015>

GUPTA, M. et al. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. February, p. 638–670, 2017a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, August 1962. ISSN 0196-4313. <https://doi.org/10.1021/i160003a005>

HAGHIGHI, E. B. et al. Accurate basis of comparison for convective heat transfer in nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 1–7, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.002>

HEKMATIPOUR, F. et al. Combined free and forced convection heat transfer of the copper oxide-heat transfer oil (CuO-HTO) nanofluid inside horizontal tubes under constant wall temperature. **Applied Thermal Engineering**, v. 100, p. 621–627, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.081>

HEMMAT ESFE, M. et al. Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO₂ (20–80)-SAE40 hybrid nano-lubricant. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 133–138, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.015>

HEMMAT ESFE, M. et al. An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 119, n. 3, p. 1817–1824, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-014-4328-8>

HEMMAT, M. et al. Experimental evaluation , sensitivity analyzation and ANN modeling of thermal conductivity of ZnO-MWCNT / EG-water hybrid nanofluid for engineering applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 125, p. 673–685, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2017.02.015>

HERBST, M. H. et al. Tecnologia dos nanotubos de carbono: Tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. **Química Nova**, v. 27, n. 6, p. 986–992, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000600025>

HIEMENZ, P. C.; DEKKER, M. Sedimentation and Diffusion and Their Equilibrium. In: HIEMENZ, P. C.; M., D. **Principles of Colloid and Surface Chemistry**. Third Edition. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., v. 1, 1997. Cap. 2, p. 62-74.

HOFFMAN, A. R. **Analise Experimental do Desempenho Termo-hidraulico de**

Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em Escoamento Monofasico. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Uberlândia, 2014. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14752>

HOLMAN, J. P. Relações empíricas e práticas para a transferência de calor em convecção forçada. In: HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor.** McGRAW HILL BOOK COMPANY, INC, 1999. Cap. 6, p. 247-294. ISBN: 0072406550.

HUANG, D. et al. Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃ water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 89, p. 620–626, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.082>

HWANG, K. S. et al. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 1–2, p. 193–199, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.032>

HWANG, Y. et al. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. **Current Applied Physics**, v. 6, n. SUPPL. 1, p. 67–71, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2006.01.014>

HWANG, Y. et al. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. **Powder Technology**, v. 186, n. 2, p. 145–153, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.020>

ILYAS, S. U. et al. Stability, rheology and thermal analysis of functionalized alumina-thermal oil-based nanofluids for advanced cooling systems. **Energy Conversion and Management**, v. 142, p. 215–229, 2017a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.079>

ILYAS, S. U. et al. Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 527, n. March, p. 11–22, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.004>

INCROPERA, F.P., DEWITT, D. P., 2001. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** John Wiley & Sons, New York.

JAFARIMOGHADDAM, A. et al. Experimental Study on Cu/Oil Nanofluids through Concentric Annular Tube: A Correlation. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 46, n. 3, p. 251–260, 2017. <https://doi.org/10.1002/htj.21210>

JIANG, L. et al. Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 260, n. 1, p. 89–94, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00176-5)

KEDZIERSKI, M. A. Viscosity and density of aluminum oxide nanolubricant. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 4, p. 1333–1340, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.017>

KOWSARY, F. et al. Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed flow regime. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 483–489, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.009>

- KRIEGER IM, DOUGHERTY TJ. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Journal of Rheology*. 1959. <https://doi.org/10.1122/1.548848>
- KUMARESAN, V. et al. Convective heat transfer characteristics of CNT nanofluids in a tubular heat exchanger of various lengths for energy efficient cooling/heating system. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 60, n. 1, p. 413–421, 2013. . <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.021>
- LEE, J.; MUDAWAR, I. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single phase and two-phase heat transfer in micro-channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 3–4, p. 452–463, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.001>
- LEE, K. et al. An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 23–24, p. 4749–4753, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.029>
- LI, D. et al. Preparation of well-dispersed silver nanoparticles for oil-based nanofluids. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 4, p. 1697–1702, 2010. <https://doi.org/10.1021/ie901173h>
- LI, J. et al. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 28, n. 5, p. 43–50, 2012. <https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6268441>
- LI, N. et al. Nanofluids containing stearic acid-modified CuO nanorods and their thermal conductivity enhancements. **Nanoscience and Nanotechnology Letters**, v. 7, n. 4, p. 314–317, 2015. <https://doi.org/10.1166/nml.2015.1923>
- LI, Y. et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**, v. 196, n. 2, p. 89–101, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.025>
- LIU, D.; YU, L. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer of nanofluids in a minichannel. p. 1–12, 2018.
- LIU, L. et al. Experimental Investigation on Preparation and Stability of Al₂O₃/CuO-water Nanofluids. n. Ap3er, p. 99–102, 2015. <https://doi.org/10.2991/ap3er-15.2015.24>
- LIU, M. S. et al. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 32, n. 9, p. 1202–1210, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.012>
- MARCUCCI. D.F. **Utilização de nanopartículas de diamante como aditivo lubrificante em sistema de refrigeração**. Universidade federal de uberlândia. Uberlândia, 2018. <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21528>
- MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism. An unabridged republication of the last. **Journal of the Franklin Institute**, v. 258, n. 6, p. 534, December 1873. ISSN 0016-0032. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(54\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0016-0032(54)90053-8)
- MEYER, J. P. et al. The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 58, n. 1–2, p. 597–609, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.074>

MOTTA, F. D. C. Caracterização da condutividade térmica , viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água. **Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.**, p. 107, 2012. <https://repositorio.usp.br/item/002285973>

MUKHERJEE, S. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 9, n. 2, p. 63–69, 2013. <https://doi.org/10.9790/1684-0926369>

MURSHED, S. M. S. Determination of effective specific heat of nanofluids. **Journal of Experimental Nanoscience**, v. 6, n. 5, p. 539-546, 2011. ISSN 1745-8080. <https://doi.org/10.1080/17458080.2010.498838>

OLIVEIRA, L. R. **Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14907>

PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide. **Experimental Heat Transfer : A Journal of , Thermal Energy Transport , Storage , and Conversion**, n. January 2013, p. 37–41, 1999. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>

PAKDAMAN, M. F. et al. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT / heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 103–111, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.02.008>

PIRHAYATI, M. et al. Convective heat transfer of oil based nanofluid flow inside a circular tube. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, v. 27, n. 2, p. 341–348, 2014. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.ije.2014.27.02b.18>

RASHMI, W. et al. Stability and thermal conductivity enhancement of carbon nanotube nanofluid using gum arabic. **Journal of Experimental Nanoscience**, v. 6, n. 6, p. 567–579, 2011. <http://dx.doi.org/10.1080/17458080.2010.487229>

RASTOGI, R. et al. Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 328, n. 2, p. 421–428, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.015>

RAZI, P. et al. Pressure drop and thermal characteristics of CuO-base oil nanofluid laminar flow in flattened tubes under constant heat flux. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 7, p. 964–971, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.04.010>

REA, U. et al. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 7–8, p. 2042–2048, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.025>

REHMAN, W. U. et al. Synthesis, characterization, stability and thermal conductivity of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and eco-friendly jatropha seed oil based nanofluid: An experimental investigation and modeling approach. **Journal of Molecular Liquids**, v. 293, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.012>

SAEEDINIA, M. et al. Thermal and rheological characteristics of CuO-Base oil

nanofluid flow inside a circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 1, p. 152–159, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.08.001>

SENARA BOTHA, S. **Synthesis and Characterization of Nanofluids for Cooling Applications**. [s.l.] UNIVERSITY OF THE WESTERN CAPE, 2007. <http://etd.uwc.ac.za/handle/11394/2187>

SERRANO, E. et al. Nanotechnology for sustainable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2373–2384, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.003>

SEZER, N. et al. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. **Powder Technology**, v. 344, p. 404–431, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.016>

SHANBEDI, M. et al. Improvement in Heat Transfer of a Two-Phased Closed Thermosyphon Using Silver-Decorated MWCNT/Water. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 35, n. 8, p. 1086–1096, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.003>

SIEDER, E. N.; TATE, G. E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, n. 12, p. 1429–1435, 1936. <https://doi.org/10.1021/ie50324a027>

VAJJHA, R. S. et al. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. **Petroleum Science and Technology**, v. 27, n. 6, p. 612–624, 2009. <https://doi.org/10.1080/10916460701857714>

VAKILI-NEZHAAD, G. R.; DORANY, A. Investigation of the effect of multiwalled carbon nanotubes on the viscosity index of lube oil cuts. **Chemical Engineering Communications**, v. 196, n. 9, p. 997–1007, 2009. <https://doi.org/10.1080/00986440902797865>

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 1, p. 1–19, 2007. ISSN 1290 - 0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>

WANG, X.; XU, X.; CHOI, S. U. S. Thermal Conductivity of Nanoparticle - **Fluid Mixture**. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v. 13, n. 4, p. 474–480, December 1999. ISSN 0887-8722. <https://doi.org/10.2514/2.6486>

WEI, B. et al. Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO₂ nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 104, p. 537–543, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.078>

WEN, D.; DING, Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 24, p. 5181–5188, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012>

WU, D. et al. Critical Issues in Nanofluids Preparation, Characterization and Thermal Conductivity. **Current Nanoscience**, v. 5, n. 1, p. 103–112, 2009. <https://doi.org/10.2174/157341309787314548>

XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701-3707, October 2000. ISSN 0017- 9310.

XUAN, Y.; LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 21, n. 1, p. 58–64, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)

XUAN, Y.; LI, Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 1, p. 151–155, 2003. <https://doi.org/10.1115/1.1532008>

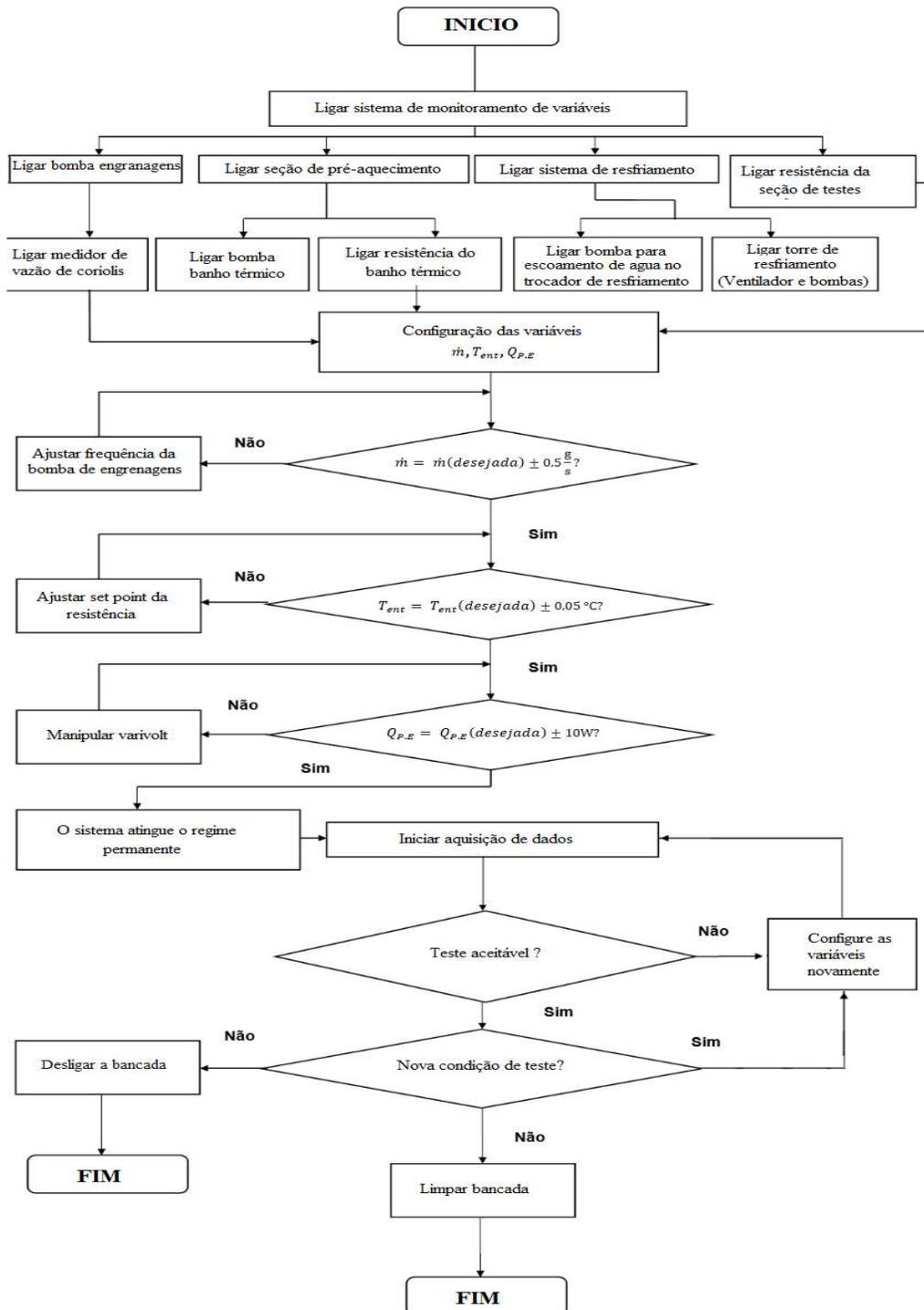
YANG, Y. et al. Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. **Journal of Applied Physics**, v. 99, n. 11, 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2193161>

YU, F. et al. Dispersion stability of thermal nanofluids. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 27, n. 5, p. 531–542, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.08.010>

YU, J. et al. Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution. **Carbon**, v. 45, n. 3, p. 618–623, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.10.010>

APÊNDICE I

O referido apêndice traz o fluxograma de operação da bancada experimental utilizada neste trabalho.



APÊNDICE II

Lista de procedimentos de varredura de comprimento de onda no software UV. Probe

2.70 - Espectrofotômetro UV-VIS.

Varredura de comprimento de onda

1. Selecione modo de leitura de varredura de comprimento de onda
2. Selecione o método na barra de ferramentas
3. Em *wavelength range (nm)*, entre com a faixa de comprimento de onda
4. Selecione velocidade do procedimento em *Scan Speed*
5. Selecione *auto sampling interval*
6. Em measuring mode selecione absorbância
7. Clique em OK

Leitura das amostras

1. Coloque o branco no comprimento de amostra (nas 2 celas). Clique o botão *baseline*
2. Coloque amostra no compartimento de amostra
3. Clique no botão Start, para iniciar varredura
4. Ao final da varredura aparecerá uma caixa de diálogo na tela, insira o nome do gráfico em File
5. Pressione OK para guardar o gráfico na memória temporária
6. Para salvar o gráfico clique em File>SaveAs (*.spc)

APÊNDICE III

Informações técnicas do óleo LUBRAX UTILE OT100

INFORMAÇÕES TÉCNICAS

LUBRAX UTILE OT

Óleo de base parafínica para transferência de calor em sistemas circulatórios de aquecimento indireto. Disponível nos graus ISO 32, 46, 68 e 100.

LUBRAX UTILE OT possui aditivação que evita a corrosão e aumenta sua resistência à oxidação, reduzindo os efeitos do craqueamento térmico sobre o óleo.

LUBRAX UTILE OT não é corrosivo nem tóxico.

LUBRAX UTILE OT é especialmente recomendado para sistemas abertos com temperaturas de operação da ordem de 180°C à 200°C. Em sistemas fechados, se lados por gás inerte, o óleo apresenta bom desempenho a temperaturas de até 300°C, sem alteração de suas características físico-químicas, desde que observadas as condições adequadas de aquecimento e circulação do óleo. Nestas circunstâncias, a vida útil do óleo é menor.

O nome **LUBRAX UTILE OT** é a nova denominação do antigo **LUBRAX INDUSTRIAL OT...-OF**.

Aditivos - anticorrosivo, antiferrugem e antioxidante

ANÁLISES TÍPICAS⁽¹⁾

GRAU ISO		32	46	68	100
Densidade a 20/4°C		0,873	0,879	0,884	0,885
Ponto de Fulgor (VA)	(°C)	228	248	254	274
Ponto de Fulgor (VF)	(°C)	206	222	224	226
Ponto de Combustão	(°C)	258	278	284	304
Temperatura de Auto-ignição	(°C)	356	380	386	392
Viscosidade a 40°C	(cSt)	32,5	47,3	68,0	103,8
Viscosidade a 100°C	(cSt)	5,50	6,80	8,73	11,45
Viscosidade a 150°C	(cSt)	2,44	2,83	3,45	4,25
Viscosidade a 315°C	(cSt)	0,64	0,70	0,80	0,92
Índice de Viscosidade		105	97	100	97
Destilação, 1 atm					
10%	(°C)	377	389	419	433
50%	(°C)	418	436	458	492
90%	(°C)	452	461	497	529
Coef. Médio de Expansão Térmica		0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
Condutividade Térmica	(kcal/h.m.°C)				
20°C		0,1132	0,1132	0,1125	0,1125
150°C		0,1050	0,1050	0,1043	0,1043
315°C		0,0950	0,0950	0,0939	0,0939
Calor Específico	(kcal/kg.°C)				
20°C		0,46	0,46	0,45	0,45
150°C		0,59	0,59	0,58	0,58
315°C		0,75	0,75	0,75	0,75

(1) As Análises Típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações. Para informações mais detalhadas primeiramente consulte nossa assistência técnica.

Abril/99

Não necessita de aditivação extra. Para descarte use as instalações dos postos de serviço, conforme Resolução CONAMA 362/05. Preservar o meio ambiente é responsabilidade de todos.

Figura A.2 Informações técnicas do óleo LUBRAX OT100

Fonte: PETROBRAS

APENDICE IV

Tabela AI. 1 - Informações técnicas do ácido oleico

Nome comercial	Ácido oleico
Formula molecular	C18H34O2
Massa molar	281,4614 g/mol
Massa específica	0,895 g/mL
Ponto de fusão	13-14 °C
Ponto de ebulição	360 °C (760 mm Hg)

Fonte: Autor

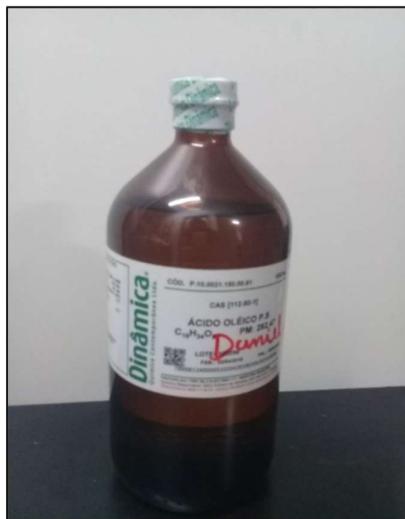


Figura A.1 Ácido oleico utilizado na funcionalização dos nanotubos de carbono fornecido pela dinamica.

Fonte: Autor