

ABDUL ORLANDO CÁRDENAS GÓMEZ

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA
DE CALOR E PERDA DE PRESSÃO DE
NANOFLUIDOS EM ESCOAMENTO MONOFÁSICO
EM DUTOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2019**

ABDUL ORLANDO CÁRDENAS GÓMEZ

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
PERDA DE PRESSÃO DE NANOFLUIDOS EM ESCOAMENTO
MONOFÁSICO EM DUTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título **de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de calor e Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2019

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

G725 2019	<p>Gómez, Abdul Orlando Cárdenas, 1989- AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PERDA DE PRESSÃO DE NANOFLUIDOS EM ESCOAMENTO MONOFÁSICO EM DUTOS [recurso eletrônico] / Abdul Orlando Cárdenas Gómez. - 2019.</p> <p>Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2043 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Pedone Bandarra Filho, Enio , 1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Engenharia Mecânica. III. Título. CDU: 621</p>
--------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 271 / COPEM				
Data:	Sete de Junho de Dois mil e Dezenove	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	11513EMC008				
Nome do Discente:	Abdul Orlando Cárdenas Gómez				
Título do Trabalho:	Avaliação Experimental da Transferência de Calor e Perda de Pressão de Nanofluidos em Escoamento Monofásico em Dutos				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Transferência de Calor de Nanofluidos				

Reuniu-se na Sala de Reuniões da FEMEC - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, 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; Gilmar Guimarães - FEMEC/UFU; José Maria Saiz Jabardo - USP/São Carlos; Luben Cabezas Gómez - USP/São Carlos; Enio Pedone Bandarra Filho - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

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(às) 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 Doutor.

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 07/06/2019, às 11:01, 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 **Luben Cabezas Gómez, Usuário Externo**, em 07/06/2019, às 11:04, 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) Substituto(a) do Magistério Superior**, em 07/06/2019, às 11:05, 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 **Gilmar Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/06/2019, às 08:08, 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 **José Maria Saiz Jabardo, Usuário Externo**, em 11/06/2019, às 16:31, 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?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1307139** e o código CRC **410A40D1**.

*Dedico a Deus todo poderoso por
todas as benções recebidas: Uma
família unida, saúde e um grande
amor.*

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Elena e meu filho José, por compartilhar momentos de imensa alegria, por encher meu coração de amor e por ser a minha fonte de motivação, para superar os desafios da vida e atingir os objetivos propostos.

Aos meus pais, Jaqueline e Orlando, por serem as pessoas que sempre me apoiaram e depositaram sua confiança durante todo meu processo de formação.

Às minhas irmãs, Katherine e Camila que junto com meus pais conformam a minha grande família, que sempre soube superar as dificuldades e adversidades.

Aos meus grandes amigos Edwin e David que tiveram uma participação emocional e profissional em todo este processo e árduo trabalho de pesquisa.

Aos membros da equipe de nanotecnologia, Italo, Vinicius, Eric, Marcelo, Daniel e Leticia que contribuíram em algumas das etapas do trabalho de pesquisa.

Ao grupo do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia, LEST-nano, por toda a ajuda, técnica, acadêmica e linguística na elaboração deste documento.

Ao professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela orientação, a confiança depositada na execução do meu trabalho e pelas exigências acadêmicas que fortaleceram meu processo de formação.

Ao professor Dr. Oscar Saul Hernandez Mendoza, por ser nosso guia e suporte aqui Brasil, que sempre esteve incondicionalmente disponível para aportar na solução de problemas ou eventualidades na realização do trabalho.

Aos Técnicos do Laboratório, Renato e Reinaldo, pela ajuda na construção e modificações da bancada experimental.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Agradeço 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 e também pelo auxílio financeiro recebido.

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.

CÁRDENAS, A.O.G. **Avaliação Experimental da Transferência de Calor e Perda de Pressão de Nanofluidos em Escoamento Monofásico em Dutos.** 2019. Tese, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

RESUMO

A presente tese trata de um estudo experimental da transferência de calor e perda de pressão de nanofluidos em escoamento monofásico no interior de tubos. Tais nanofluidos foram produzidos com base em uma mistura água e etileno glicol (H₂O:EG 50:50 wt%) e também com óleo térmico OT-100. As nanopartículas utilizadas foram de prata, alumina, nanotubos de carbono e diamante. Uma bancada experimental foi construída e devidamente instrumentada para satisfazer as condições nominais de ensaio estabelecidas. O fluxo de calor uniforme aplicado à superfície do tubo variou entre 10 e 18 kW/m², a vazão mássica entre 10 e 80 g/s. A temperatura de entrada na seção de testes foi mantida constante em 15 °C, 25 °C e 45 °C. As propriedades termofísicas dos nanofluidos, condutividade, viscosidade e massa específica foram medidas experimentalmente e seus valores utilizados para a análise da transferência de calor. Em geral, o coeficiente de transferência de calor para nanofluidos apresentou incrementos significativos em comparação ao fluido base. Já os resultados para a queda de pressão de nanofluidos não apresentaram diferenças significativas quando comparados ao fluido base. Modelos para o cálculo da condutividade térmica e viscosidade, além daqueles para transferência de calor e perda de pressão foram propostos, apresentando boa concordância com os resultados experimentais.

Palavras chave: Nanofluidos, nanopartículas, coeficiente de transferência de calor, queda de pressão, condutividade térmica, viscosidade.

CÁRDENAS, A.O.G. **Experimental Evaluation of the Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluids in Single-phase Flow in Pipes**. 2019. PhD Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

ABSTRACT

The present work deals on experimental study of thermal-hydraulic performance of nanofluids in single-phase flow inside tubes. Two different base fluids were used, water and ethylene glycol (50:50% wt) as well as OT-100 thermal oil. Silver, alumina, carbon nanotubes and diamond nanoparticles were dispersed into the base fluid using the two-step method. The tests were performed in single-phase flow, fully developed turbulent regime, inside smooth and horizontal tubes with uniform heat flux applied on the surface. An experimental bench was built and instrumented to guarantee the imposed conditions for the tests. The uniform heat flux was varied from 10 and 18 kW/m², mass flow rate between 10 and 80 g/s. The inlet temperature was maintained constant in 15 °C, 25 °C e 45 °C. The thermophysical properties, thermal conductivity, viscosity and density were obtained experimentally and its values used to evaluate the heat transfer and pressure drop. In general, the heat transfer coefficient for nanofluids showed significant increments in comparison to the base fluids. The pressure drop for nanofluids was slightly higher or even the same order to those ones obtained by the base fluid. Models were proposed to evaluate the heat transfer coefficient and pressure drop as well as the thermal conductivity and viscosity showing good agreement with the experimental results.

Keywords: Nanofluids, nanoparticles, heat transfer coefficient, pressure drop, thermal conductivity and viscosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Alótropos de nanomateriais a base de carbono. Fonte: (KUMAR e KUMBHAT, 2016)	8
Figura 2.2 - Influência do tamanho, forma e composição na dispersão da luz e nas cores resultantes das nanopartículas de prata (os tamanhos das nanopartículas são todos aproximados). Fonte: (MIRKIN, 2005)	10
Figura 2.3 - Micrografia eletrônica de transmissão representativa de compósito de nanopartículas de polímero-ouro, apresentando nanopartículas de ouro de 13 nm encapsuladas dentro de nanopartículas esféricas maiores de poli (divinilbenzeno).	11
Figura 2.4 - Número de publicações por área temática (Fonte dos dados: Portal Elsevier)..	14
Figura 2.5 – Variáveis na produção de nanofluidos. Fonte: (SEZER, ATIEH e KOÇ, 2019).	16
Figura 2.6 - Distribuições de tamanho de partículas em nanofluidos em função dos métodos de dispersão. (a) CB/água (b) Ag/óleo de silicone	21
Figura 2.7 - Representação esquematizada de uma nanopartícula com camada interfacial num fluido circundante. Fonte: Adaptado de (MURSHED, LEONG e YANG, 2008)	27
Figura 2.8 - Fatores que afetam a condutividade térmica do nanofluido. Fonte: adaptado de (ARSHAD, JABBAL, <i>et al.</i> , 2019).....	30
Figura 2.9 - Representação esquemática da camada interfacial em uma dispersão de nanopartículas. Yu e Choi (2003).	36
Figura 2.10 - Esquema de nanopartículas aglomeradas em uma dispersão onde (R_a) é o raio de giro do agregado. Prasher, <i>et al.</i> (2006).....	36

Figura 2.11 -Comparação dos métodos de medição da condutividade térmica dos nanofluidos. Fonte: Adaptado de Paul, <i>et al.</i> (2010) e atualizados com dados fornecidos pelo portal Elsevier.....	38
Figura 3.1 - Processo de produção de nanofluidos.....	56
Figura 3.2 - (a) Homogeneizador de alta pressão. (b) Esquema do processo de homogeneização. Bandarra Filho <i>et al.</i> (2014)	57
Figura 3.3 – Nanofluidos de prata (a) Amostras (Ag_20) 24 horas após da produção. (b) Amostras (Ag_20) após de dois meses de produzidas. (c) Amostras (Ag_80) 24 horas após da produção. (d) Amostras (Ag_80) após de dois meses de produzidas.....	61
Figura 3.4 – Nanofluidos com nanopartículas a base de carbono (a) Amostras (DO) 24 horas após da produção. (b) Amostras (DO) após de um mês de produzidas. (c) Amostras (CNT_300) 24 horas após da produção. (d) Amostras (CNT_300) após de um mês de produzidas. (e) Amostras (CNT_800) 24 horas após da produção. (f) Amostras (CNT_800) após de um mês de produzidas.....	62
Figura 3.5 –Nanofluidos de Alumina Al_2O_3 (a) Uma hora após da produção. (b) 24 hora após da produção.....	63
Figura 3.6 - Processo de produção de nanofluidos.....	64
Figura 3.7 –Nanofluidos de prata (OT-Ag_20) a base de óleo térmico (a) 24 horas após da produção. (b) Um mês após da produção.....	66
Figura 3.8 –Nanofluidos de nanotubo de carbono (OT-CNT_800) a base de óleo térmico (a) 24 horas após da produção. (b) um mês após da produção. (c) Floculação do nanofluido OT-CNT_800	66
Figura 3.9 - Condutivímetro Linseis e vista aproximada do sensor THB. Fonte: (OLIVEIRA, 2018)	67
Figura 3.10- Aparato experimental para medição de condutividade térmica no laboratório LEST-nano. Fonte: (OLIVEIRA, 2018).	69
Figura 3.11.-Equipamento experimental para determinar a massa específica e da viscosidade dinâmica das amostras.....	69

Figura 3.12- Representação esquematizada da célula de medição do viscosímetro modelo Stabinger™ SVM™ 3000. Fonte: Editado do manual de operação.....	70
Figura 3.13 - Diagrama esquematizado da bancada experimental.....	72
Figura 3.14 - Volume de controle para o balanço de energia.....	73
Figura 3.15 – Representação esquematizada na instalação da instalação dos instrumentos de medição de temperatura. (a) Posição de instalação na parede do tubo da seção de testes. (b) Vista frontal e lateral de um segmento da seção de teste.	74
Figura 3.16 - Fixação dos termopares no tubo da seção de testes.	75
Figura 3.17 - Detalhes construtivos e operacionais da seção de teste. (a) Fixação das resistências tipo fita flexíveis. (b) Equipamentos (Variac, amperímetro e multímetro digital) do sistema de aquecimento da seção de testes.	76
Figura 3.18- Detalhe da instalação dos transmissores de temperatura na entrada e saída da seção de testes.	76
Figura 3.19 – (a) Esquema estrutural da instalação dos instrumentos de medição na seção de testes. (b) Seção de teste isolada.....	77
Figura 3.20 - (a) Bombas de engrenagens com acoplamento magnético. (b) Válvula eliminadora de ar. (c) Medidor de vazão mássica do tipo coriolis.	78
Figura 3.21 – Representação esquematizada do sistema de refrigeração.....	80
Figura 3.22 - Diagrama esquematizado da seção de pré-aquecimento.	81
Figura 3.23 - Tela principal da interface gráfica em labView®.....	82
Figura 3.24 - Chassi NIcDAQ-9178 CompactDAQ USB utilizado no sistema de aquisição de dados.....	82
Figura 3.25 - Painéis elétricos. (a) Painel de aquisição de dados. (b) Painel de potência.	84
Figura 3.26 - Equipamento experimental final.....	84
Figura 3.27 - Resultados experimentais para água destilada relacionando a potência elétrica, $QP.E.$, com a potência calculada pelo balanço de energia, $QB.E.$	87

Figura 3.28 - Resultados obtidos do fator de atrito em função do número de Reynolds. (a) Comparação modelo de Petukhov (1970). (b) Comparação modelo de Blasius.....	89
Figura 3.29 - Diagramas esquematizados. (a) Resistência térmicas na seção de testes. (b) Volume de controle em torno da temperatura média do fluido	90
Figura 3.30 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de (SIEDER e TATE, 1936).	93
Figura 3.31 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de Gnielinski (1975).	94
Figura 4.1 - Massa específica dos nanofluidos a base da mistura ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Prata com diâmetro de 20 nm. (b) Prata com diâmetro de 80 nm. (c) Alumina com diâmetro de 40-80 nm. (d) Nanotubo de carbono com $r=800$. (e) Nanotubo de carbono com $r=300$. (f) Diamante com diâmetro de 3-6 nm.	98
Figura 4.2 – Massa específica relativa dos nanofluidos a base de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) em função da concentração volumétrica.....	100
Figura 4.3 - Calor específico dos nanofluidos a base da mistura ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Prata. (c) Alumina. (d) Nanotubo de carbono. (f) Diamante.	102
Figura 4.4 - Condutividade térmica dos nanofluidos de prata em função da variação da temperatura do fluido. (a) Ag com diâmetro de 20 nm. (b) Ag com diâmetro de 80 nm	103
Figura 4.5 - Condutividade térmica dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido.	105
Figura 4.6 - Condutividade térmica dos nanofluidos de Nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) CNT com razão de aspecto $r=800$. (b) CNT com razão de aspecto $r=300$	106
Figura 4.7 - Condutividade térmica dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido.	108

Figura 4.8 – Condutividade térmica relativa das amostras de nanofluidos com maior concentração volumétrica de nanopartículas em função da temperatura.....	109
Figura 4.9 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de prata (Ag) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, Ag com d=20 nm. (b) Viscosidade relativa, Ag com d=20 nm. (c) Viscosidade dinâmica, Ag com d=80 nm. (d) Viscosidade relativa, Ag com d=80 nm.	110
Figura 4.10 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica. (b) Viscosidade relativa.	111
Figura 4.11 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, CNT_800. (b) Viscosidade relativa, CNT_800. (c) Viscosidade dinâmica, CNT_300. (d) Viscosidade relativa, CNT_300.....	112
Figura 4.12 – Viscosidade dinâmica dos nanofluidos de diamante (DO) em função da variação da temperatura do fluido.	114
Figura 4.13 – Viscosidade relativa das amostras de nanofluidos com maior concentração volumétrica de nanopartículas em função da temperatura.....	116
Figura 4.14 - Massa específica e massa específica relativa dos nanofluidos a base de OT-100 em função da variação da temperatura do fluido. (a) Massa específica, OT-Ag_80. (b) Massa específica relativa, OT-Ag_80. (c) Massa específica, OT-CNT_800. (d) Massa específica relativa, OT-CNT_800.....	117
Figura 4.15 - Massa específica relativa dos nanofluidos a base de OT-100 em função da concentração volumétrica.	118
Figura 4.16 - Calor específico e relativo dos nanofluidos em função da variação da temperatura do fluido. (a) Cp, OT-Ag_80. (b) Cp-relativo, OT-Ag_80. (c) Cp, OT-CNT_800. (d) Cp-relativo, OT-CNT_800.....	120
Figura 4.17 - Condutividade térmica e relativa dos nanofluidos em função da variação da temperatura do fluido. (a) Condutividade térmica, OT-Ag_80. (b) Condutividade relativa, OT-Ag_80. (c) Condutividade térmica, OT-CNT_800. (d) Condutividade relativa, OT-CNT_800.	122

- Figura 4.18 - Condutividade térmica relativa das amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100) e da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da concentração volumétrica. 124
- Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de prata e nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, OT-Ag_80. (b) Viscosidade relativa, OT-Ag_80. (c) Viscosidade dinâmica, OT-CNT_800. (d) Viscosidade relativa, OT-CNT_800. 125
- Figura 4.20 – Viscosidade dinâmica relativa em função da temperatura das amostras de nanofluidos a base de óleo térmico (OT-100) e da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) com os mesmos tipos de nanopartícula e na maior concentração volumétrica. 126
- Figura 4.21 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostras de nanofluido de prata. (a) Ag_20 *hexp x G*. (b) Ag_20 *hexp x Re*. (c) Ag_80 *hexp x G*. (d) Ag_80 *hexp x Re*. 129
- Figura 4.22 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido de alumina (Al₂O₃), (a) *hexp x G*. (b) *hexp x Re*. 131
- Figura 4.23 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800 *hexp x G*. (b) CNT_800 *hexp x Re*. (c) CNT_300 *hexp x G*. (d) CNT_300 *hexp x Re*. 132
- Figura 4.24 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido de diamante (DO), (a) *hexp x G*. (b) *hexp x Re*. 134
- Figura 4.25 – Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de prata. (a) Ag_20. (b) Ag_80. 136
- Figura 4.26 – Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de alumina (Al₂O₃). 136
- Figura 4.27 - Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800. (b) CNT_300. 137
- Figura 4.28 - Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de diamante (DO). 138

- Figura 4.29 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostra de nanofluido a base de óleo térmico. (a) OT-Ag_80 $h_{exp} \times G$. (b) OT-Ag_80 $h_{exp} \times Re$. (c) OT-CNT_800 $h_{exp} \times G$. (d) OT-CNT_800 $h_{exp} \times Re$ 140
- Figura 4.30 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de prata. (a) Ag_20 $\Delta PL \times G$. (b) Ag_20 $f \times Re$. (c) Ag_80 $\Delta PL \times G$. (d) Ag_80 $f \times Re$ 142
- Figura 4.31 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3). (a) $\Delta PL \times G$. (b) $f \times Re$ 143
- Figura 4.32 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800 $\Delta PL \times G$. (b) CNT_800 $f \times Re$. (c) CNT_300 $\Delta PL \times G$. (d) CNT_300 $f \times Re$ 144
- Figura 4.33 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de diamante (DO). (a) $\Delta PL \times G$. (b) $f \times Re$ 145
- Figura 4.34 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) OT-Ag_80 $\Delta PL \times G$. (b) OT-Ag_80 $f \times Re$. (c) OT-CNT_800 $\Delta PL \times G$. (d) OT-CNT_800 $f \times Re$ 147
- Figura 4.35 - Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$]. (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al_2O_3 . (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO. 150
- Figura 4.36 - Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$]. (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800. 151
- Figura 4.37 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) Ag_20 ($k \times \phi$). (b) Ag_20 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) Ag_80 ($k \times \phi$). (d) Ag_80 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (e) Al_2O_3 ($k \times \phi$). (f) Al_2O_3 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). 153
- Figura 4.38 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) CNT_800 ($k \times \phi$). (b) CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) CNT_300 ($k \times \phi$). (d) CNT_300 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (e) DO ($k \times \phi$). (f) DO ($k_{exp} \times k_{mod.}$). 154

- Figura 4.39 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) OT-Ag_80 ($k \times \phi$). (b) OT-Ag_80 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) OT-CNT_800 ($k \times \phi$). (d) OT-CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). 156
- Figura 4.40 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) Ag_20 ($k \times \phi$). (b) Ag_20 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) Ag_80 ($k \times \phi$). (d) Ag_80 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (e) Al₂O₃ ($k \times \phi$). (f) Al₂O₃ ($k_{exp} \times k_{mod.}$). 158
- Figura 4.41 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para viscosidade dinâmica. (a) CNT_800 ($k \times \phi$). (b) CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) CNT_300 ($k \times \phi$). (d) CNT_300 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (e) DO ($k \times \phi$). (f) DO ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (d). 159
- Figura 4.42 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) OT-Ag_80 ($k \times \phi$). (b) OT-Ag_80 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). 160
- Figura 4.43 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) OT-CNT_800 ($k \times \phi$). (b) OT-CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). ... 161
- Figura 4.44 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação de Gnielinski (1975). (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO. 162
- Figura 4.45- Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação proposta em regime turbulento. (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO. 165
- Figura 4.46 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação de Sieder e Tate (1936). (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO. 167
- Figura 4.47 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação proposta em regime laminar para as amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%). (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO. 169
- Figura 4.48 - Comparação entre os resultados experimentais da transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação de Sieder e Tate (1936). (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800. 170

- Figura 4.49 - Comparação entre os resultados experimentais da transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação proposta. (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800..... 171
- Figura 4.50 - Comparação entre o coeficiente de atrito experimental em regime turbulento para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e a correlação proposta. (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO..... 174
- Figura 4.51 - Comparação entre o coeficiente de atrito experimental em regime laminar para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e a correlação proposta. (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO..... 176
- Figura 4.52 - Comparação entre os resultados experimentais do fator de atrito das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação proposta (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800..... 178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. –Materiais de nanopartículas metálicas mais promissores	9
Tabela 2.2 - Condutividade térmica de aditivos e fluidos base utilizados na preparação de nanofluidos.	15
Tabela 2.3 – Tamanho das nanopartículas, potencial zeta e pH de dois nanofluidos segundo o método de produção	22
Tabela 2.4- Sínteses de nanofluidos reportados na literatura	23
Tabela 2.5 - Modelos para prever a condutividade térmica de nanofluidos	37
Tabela 2.6 - Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade dos nanofluidos ...	44
Tabela 2.7 - Trabalhos experimentais sobre a transferência de calor por convecção em nanofluidos.	51
Tabela 3.1 Características das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido.	57
Tabela 3.2 – Descrição das amostras de nanofluido produzidos.....	58
Tabela 3.3 - Comparação entre a concentração volumétrica e mássica estimada e a medida após da produção dos nanofluidos.	59
Tabela 3.4 Características das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido.	64
Tabela 3.5 – Descrição das amostras de nanofluido produzidos a base de óleo térmico.	65
Tabela 3.6- Propriedades do condutímetro THB-1 Linseis fornecidas pelo fabricante.	68
Tabela 3.7- Incerteza de medição fornecidas pelo fabricante.	71
Tabela 3.8 - Módulos e instrumentos que compõem o sistema de monitoramento.	83

Tabela 3.9 - Condições para os testes com água destilada.	86
Tabela 3.10 - Incertezas dos parâmetros primários ou variáveis medidas pelos instrumentos.	95
Tabela 3.11 - Incertezas de parâmetros secundários ou variáveis calculadas dependente das medições	96
Tabela 4.1 - Comparação dos valores massa específica entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura para todas as amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%)	99
Tabela 4.2 - Comparação dos valores massa específica entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura para todas as amostras de nanofluido a base de (OT-100)	119
Tabela 4.3 - Variação dos parâmetros operacionais de ensaio	127
Tabela 4.4 - Parâmetros nominais que caracterizam a média dos resultados.....	135
Tabela 4.5 – Constantes do modelo de condutividade térmica para amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%).	152
Tabela 4.6 - Constantes do modelo de condutividade térmica para amostras de nanofluido a base de (OT-100).	155
Tabela 4.7 - Constantes do modelo de viscosidade dinâmica para amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%).	157
Tabela 4.8 - Constantes do modelo de viscosidade dinâmica para amostras de nanofluido a base de (OT-100).	160
Tabela 4.9 - Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Gnielinski (1975).	161
Tabela 4.10 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime turbulento e indicadores de ajuste.....	164
Tabela 4.11 -Desvio médio dos dados experimentais em regime turbulento e o modelo de descrito na Eq. 4.7.....	164

Tabela 4.12- Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Sieder e Tate (1936).	166
Tabela 4.13 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime laminar para amostras a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste.....	168
Tabela 4.14 -Desvio médio dos dados experimentais em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.7.....	168
Tabela 4.15 - Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Sieder e Tate (1936).	170
Tabela 4.16 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime laminar para amostras a base de OT-100 e indicadores de ajuste.....	171
Tabela 4.17 - Desvio médio dos dados experimentais em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.8.....	172
Tabela 4.18 - Constantes para o modelo proposto do fator de atrito em regime turbulento e indicadores de ajuste.....	173
Tabela 4.19 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime turbulento e o modelo de descrito na Eq. 4.10.....	173
Tabela 4.20 - Constantes do modelo do fator de atrito em regime laminar para as amostras a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste do modelo.....	175
Tabela 4.21 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.10.....	177
Tabela 4.22 - Constantes do modelo do fator de atrito em regime laminar para as amostras a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste do modelo.....	178
Tabela 4.23 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.10.....	178

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

A_s	- área superficial [m^2]
c_p	- calor específico a calor a pressão constante [kJ/kgK]
c_g	- coeficiente geométrico
d	- diâmetro médio da nanopartícula [nm]
d_f	- dimensão fractal
D	- diâmetro interno do tubo [m]
e	- espessura [mm]
E	- Erro
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	- condutividade do agregado [W/mK]
k_B	- constante de Boltzman [J/K]
l	- comprimento da nanopartícula [μm]
ln	- logaritmo natural
L	- comprimento do tubo [m]
m	- massa [kg]
\dot{m}	- vazão mássica [kg/s]

n	- número do ponto de medição da temperatura
P	- pressão [Pa]
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_a	- raio de giro do agregado
R	- resistência térmica [m^2K/W]
R_k	- resistência térmica interfacial [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}_B	- potência de bombeamento [W]
wt	- concentração mássica

Letras gregas

α	- difusividade térmica [m^2/s]
ΔP	- queda de pressão [Pa]
ΔT	- diferenca de temperatura [$^{\circ}C$]
τ_H	- escala de tempo para que o calor se difunda em uma mesma distância equivalente à escala do comprimento caraterístico de uma partícula [s]
τ_D	- escala de tempo para uma partícula deslocar seu comprimento [s]
μ	- viscosidade dinâmica [kg/ms]

ϕ	- concentração volumétrica
π	- razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência
ρ	- massa específica [kg/m^3]
ψ	- esfericidade, definida pela razão entre a área superficial de uma esfera, de mesmo volume de uma partícula e a área superficial desta partícula

Números adimensionais

Nu	- número de Nusselt
Pr	- número de Prandtl
Re	- número de Reynolds

Abreviações

Ag	- Prata
CNT	- nanotubos de carbono
DO	- Diamante
LEST-nano	- Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
OT	- Óleo térmico
PVD	- Deposição física de vapor
SANSS	- <i>Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System</i>
SWCNT	- Nanotubo de carbono de parede simples
UFU	- Universidade Federal de Uberlândia
USP-EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
VEROS	- <i>Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate</i>
MWCNT	- nanotubo de carbono de parede múltipla

Subscritos

<i>BE</i>	- balaço de energia
<i>m</i>	- médio
<i>nc</i>	- nanocamada
<i>nf</i>	- nanofluido
<i>np</i>	- nanopartícula
<i>ent</i>	- entrada
<i>exp</i>	- experimental
<i>ext</i>	- externo
<i>fb</i>	- fluido base
<i>int</i>	- interno
<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

SUMARIO

CAPÍTULO I	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Estrutura da tese.....	4
CAPÍTULO II	6
2.1. Considerações Iniciais	6
2.2. Nanomateriais	7
2.2.1. Nanopartículas baseadas em carbono	7
2.2.2. Nanopartículas a base de materiais inorgânicos	9
2.2.3. Nanopartículas a base de materiais orgânicos	10
2.2.4. Nanomateriais compostos ou nanopartículas combinadas	10
2.3. Nanofluidos	11
2.3.1. Contexto Histórico	11
2.3.2. Características gerais.....	13
2.3.3. Preparação de nanofluidos.....	16
2.4. Propriedades termofísicas dos nanofluidos	24
2.4.1. Massa específica	25
2.4.2. Calor específico	26
2.4.3. Condutividade Térmica	29
2.4.4. Viscosidade.....	40

2.5. Transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos	44
2.6. Perda de carga e fator de atrito em escoamento interno de nanofluidos	52
CAPÍTULO III	55
3.1. Preparação das amostras de nanofluido	55
3.1.1. Nanofluidos a base da mistura água e etileno glicol (H ₂ O:EG 50:50 wt%)	56
3.1.2. Nanofluidos a base de óleo térmico OT-100.....	63
3.2. Caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos.....	67
3.2.1. Condutividade térmica.....	67
3.2.2. Viscosidade e massa específica.....	69
3.2.3. Calor específico	71
3.3. Bancada Experimental	71
3.3.1. Seção de Testes	73
3.3.2. Sistema de escoamento e medição de vazão mássica	78
3.3.3. Sistema de refrigeração	79
3.3.4. Sistema de pré-aquecimento.....	80
3.3.5. Sistema de monitoramento e aquisição de dados	81
3.4. Análise e validação da bancada experimental.....	85
3.4.1. Balaço de energia e isolamento da seção de testes.....	86
3.4.2. Queda de pressão e fator de atrito	87
3.4.3. Coeficiente de transferência de calor	90
3.5. Análise de incertezas	94
CAPÍTULO IV	97
4.2. Propriedades termofísicas no nanofluidos a base da mistura (H ₂ O:EG 50:50 wt%).....	97
4.2.1. Massa específica	97
4.2.2. Calor específico	101
4.2.3. Condutividade térmica.....	102

4.2.4. Viscosidade dinâmica.....	109
4.3. Propriedades termofísicas no nanofluidos a base de óleo térmico (OT-100)	117
4.3.1. Massa específica	117
4.3.2. Calor específico	120
4.3.3. Condutividade térmica.....	121
4.3.4. Viscosidade dinâmica.....	124
4.4. Transferência de calor por convecção dos nanofluidos a base da mistura (H ₂ O:EG 50:50 wt%)	127
4.4.1. Coeficiente de transferência de calor por convecção	128
4.4.2. Análise da transferência de calor, utilizando os valores médios dos testes realizados	135
4.5. Transferência de calor por convecção dos nanofluidos a base de (OT-100)	139
4.5.1. Coeficiente de transferência de calor por convecção	139
4.6. Queda de pressão e fator de atrito dos nanofluidos	141
4.6.1. Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido a base da mistura (H ₂ O:EG 50:50 wt%).....	141
4.6.2. Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100).....	146
4.7. Desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos.....	148
4.7.1. Amostras de nanofluido a base da mistura (H ₂ O:EG 50:50 wt%).....	148
4.7.2. Amostras de nanofluido a base de a base de óleo térmico (OT-100)	151
4.8. Modelos matemáticos propostos para as propriedades termofísicas	152
4.8.1. Modelo de condutividade térmica nas amostras a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%).....	152
4.8.2. Modelo de condutividade térmica amostras a base de (OT-100).....	155
4.8.3. Modelo da viscosidade dinâmica nas amostras a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%).....	157
4.8.4. Modelo da viscosidade dinâmica nas amostras a base de (OT-100).	160

4.9. Modelo matemático proposto para a transferência de calor por convecção	161
4.9.1. Transferência de calor por convecção em regime turbulento nas amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%)	161
4.9.2. Transferência de calor por convecção em regime laminar nas amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%)	166
4.9.3. Transferência de calor por convecção em regime laminar nas amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100)	170
4.10. Modelo matemático proposto para fator de atrito	172
4.10.1. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%) em regime turbulento	172
4.10.2. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de (H ₂ O:EG 50:50 wt%) em regime laminar	175
4.10.3. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de (OT-100) em regime laminar	177
CAPÍTULO V	179
5.1. Conclusões Finais	179
5.2. Recomendações a Trabalhos Futuros	182
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184
APÊNDICE I	201
APÊNDICE II	205
APÊNDICE III	207
1APÊNDICE IV	208

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A obtenção de sistemas energeticamente eficientes, é um dos desafios científicos mais importantes para o desenvolvimento tecnológico dos processos industriais que se aplicam em diversas áreas como, por exemplo, a indústria aeroespacial, automotiva, telecomunicações, manufatura de grande escala, eletrônica ou naval entre outras. O desenvolvimento e a evolução da tecnologia associado com o gerenciamento energético das fontes renováveis e não renováveis de energia, exigiu métodos mais eficientes de transferência de calor (SAJID e ALI, 2019) . Assim, todos os processos que envolvem a transferência de calor como meio de gerenciamento energético, apresentam uma tendência crescente de pesquisa para o desenvolvimento de novas aplicação que possibilitem o aumento de eficiência energética.

A intensificação dos processos de transferência de calor para obter sistemas energeticamente eficientes, depende de: (1) a características geométricas (áreas de transferência de calor), (2) os gradientes de temperaturas e (3) o coeficiente de transferência de calor (dependente da geometria, do escoamento, e das propriedades do fluido). Neste sentido, a aplicação de técnicas passivas que agem no caso (1), como manipulação das geometrias e materiais da superfície de troca dos trocadores de calor, assim como aplicação de superfícies rugosas e dispositivos que aumentem a área de troca ou que tornem o escoamento turbulento, tem apresentado resultados importantes. Por outro lado, a aplicação de técnicas ativas, que agem no caso (2), como a aplicação de vibração das superfícies de troca, aplicação de campos eletrostáticos, sucção ou injeção, são alguns dos métodos utilizados para intensificar o processo de transferência de calor, porem resulta em uma demanda de energia que pode ser significativa na hora de verificar a eficiência global do

sistema, além de favorecer ao incremento de tamanho do sistema, tornando mais onerosa e difícil a sua sustentabilidade. Contudo, as mudanças das geometrias, dos materiais e dos dispositivos empregados para obter maior eficiência, os sistemas térmicos podem apresentar ainda um maior potencial de aprimoramento, que é limitado, em parte pelas propriedades térmicas dos fluidos de arrefecimento convencionais como água, óleos térmicos ou etileno glicol que agem no caso (3). Razão pela qual os grupos de pesquisa têm focado seus trabalhos na intensificação da transferência de calor nos processos térmicos por intermédio do desenvolvimento de fluidos que incrementem a transferência de calor sem penalizar, excessivamente, o consumo de energia pelo bombeamento.

Assim, o avanço da ciência, tecnologia e o advento da nanotecnologia, possibilitou a eventual chance de sintetizar materiais na escala nanométrica. Como consequência, novas iniciativas surgiram que buscavam a intensificação das propriedades térmicas dos fluidos de trabalho como a relatada por Masuda, *et al.* (1993) onde partículas sólidas ultrafinas de Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , foram dispersas em água, por intermédio da aplicação da técnica de repulsão eletrostática, apresentando um aumento da condutividade na dispersão proporcional à concentração. Estas partículas ultrafinas, com dimensões compreendidas entre 1 e 100 nanômetros (*nm*) ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$), que ao serem dispersas em fluidos convencionais de arrefecimento como água, óleos ou etileno glicol, surgiu o conceito inovador de “Nanofluidos” como foi denominado por Choi (1995).

Nas últimas duas décadas, os nanofluidos foram idealizados como uma nova geração de fluidos e foram propostos como um candidato ideal para aumentar a transferência de calor quando comparados com fluidos térmicos convencionais. Entretanto, mesmo sendo uma área recentemente estudada, encontra-se um crescente número de publicações que analisam características como a produção, caracterização de propriedades e o desempenho termo-hidráulico dos diferentes tipos de nanofluidos, visando uma aplicação desta nova classe de fluidos de trabalho. No entanto, a discussão e divergência dos resultados presentes na literatura, independentemente do método de avaliação utilizado (analítico, numérico ou experimental) dificultam e limitam a capacidade de consenso dos grupos de pesquisa do mundo todo.

Com base nos argumentos mencionados anteriormente, o presente trabalho pretende avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos a base dois tipos de fluidos, o primeiro uma mistura água e etileno glicol ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) e o segundo óleo térmico OT-100 em escoamentos sem mudança de fase no interior de tubos horizontais, a fim determinar sua possível aplicabilidade em processos que envolvam transferência de calor

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo do trabalho é avaliar teórica e experimentalmente o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos utilizando como fluidos base inicialmente uma mistura água e etileno glicol ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) e óleo térmico OT-100, em escoamentos sem mudança de fase no interior de tubos horizontais. Portanto, para fundamentar a análise proposta é essencial determinar experimentalmente parâmetros como o coeficiente de transferência de calor por convecção, a queda de pressão e a potência de bombeamento dos fluidos escoando no interior de um tubo circular horizontal em condições de regime laminar e turbulento.

Nesse sentido, foram estabelecidos a seguir uma série de objetivos específicos que descrevem as etapas a serem realizadas para executar o presente trabalho.

1.2.2. Objetivos específicos

Para atingir as condições específicas de ensaio ao longo do desenvolvimento da pesquisa, o laboratório LEST-nano dispõe de uma bancada experimental que precisou de modificações, como a troca instrumentos e elementos em algumas seções da bancada que possibilitaram realizar os experimentos com os fluidos nas condições térmicas e fluidodinâmicas exigidas.

Uma vez executadas as modificações na bancada experimental e em decorrência do projeto de pesquisa, os objetivos específicos que foram atingidos são:

- Realizar uma revisão contínua do estado da arte dos temas relacionados com a utilização e aplicação de nanofluidos, visando analisar os mecanismos que influenciam a transferência de calor tais como: (I) Os processos de síntese, dispersão e metodologias para aumentar a estabilidade das misturas; (II) As propriedades termofísicas dos fluidos (viscosidade, condutividade térmica, calor específico e massa específica); (III) natureza, tamanho e morfologia das nanopartículas.
- Produzir os nanofluidos utilizando como fluido base de dois tipos de fluidos, o primeiro uma mistura de água e etileno glicol ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) e o segundo, o óleo térmico OT100 fornecido pela Petrobras, empregando nanopartículas de diferente natureza, tamanho, morfologia e em variadas concentrações.
- Realizar a medição experimental e caracterização das propriedades termofísicas tais como: condutividade térmica, viscosidade, calor específico e massa específica;

- Executar os testes para determinar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor por convecção, o fator de atrito e potência de bombeamento, necessários para realizar a avaliação do desempenho termo-hidráulicos dos nanofluidos;
- Verificar a influência da variação da concentração de nanopartículas sobre a transferência de calor e a queda de pressão;
- Validar os resultados experimentais mediante a comparação com dados obtidos da literatura a partir de correlações ou de outros resultados experimentais especialmente derivadas para nanofluidos;
- Mensurar o desafio prático da obtenção e utilização de nanofluidos em sistemas térmicos com relação à estabilidade e isenção de deposição de nanopartículas sobre as superfícies expostas em contato com o nanofluido.

1.3. Estrutura da tese

O presente documento está organizado de tal forma que descreve todas as etapas realizadas para alcançar o objetivo principal, mencionado anteriormente. Neste sentido, o presente documento é composto por cinco capítulos, cada um subdividido em seções e subseções que especificam detalhadamente características da execução do trabalho.

O capítulo 2, apresenta uma detalhada revisão bibliográfica. Inicialmente, são apresentados conceitos e terminologias compreendidos dentro da nanociência e nanotecnologia. Também é abordada a caracterização das propriedades termofísicas de nanofluidos (massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade). Os principais trabalhos, relacionados à transferência de calor por convecção forçada em escoamento monofásico de nanofluidos, foram relacionados de maneira cronológica. Por último é compreendida a revisão de perda de carga, o coeficiente de atrito e potência de bombeamento para escoamento interno de nanofluidos, sendo estes parâmetros de grande importância na avaliação termo-hidráulica dos nanofluidos.

O capítulo 3, inicialmente são apresentados resultados do processo de dispersão, avaliação de estabilidade, relata as características referentes à construção da seção de testes, mudanças de alguns dos elementos que compõem o equipamento experimental, as considerações teóricas sobre do processo de transferência de calor que fundamenta a realização dos experimentos. Este capítulo apresenta também uma análise e validação de resultados dos testes previamente realizados com água destilada e uma mistura de água e etileno glicol. Tais testes foram realizados com o objetivo de verificar o comportamento da

bancada e o bom funcionamento do sistema de monitoramento desenvolvido em LabView®, dos instrumentos de medição e a correta manipulação das variáveis, que permitiam realizar o controle dos parâmetros monitorados (vazão mássica, temperatura, pressão e potência).

O capítulo 4, refere-se à análise dos resultados obtidos experimentalmente para nanofluidos a base de água e etileno glicol ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) e óleo térmico OT-100. Inicialmente são apresentados os resultados das medições de condutividade térmica, viscosidade e massa específica, assim como do calor específico, que foram obtidos por intermédio do modelo analítico comumente utilizado. A parte final do capítulo é dedicada à análise do desempenho termo-hidráulico das amostras dos nanofluidos produzidos. A análise é baseada na comparação entre os resultados experimentais obtidos para os nanofluidos, com os obtidos para o fluido base, a fim de identificar se houve ou não intensificação em parâmetros como o fator de atrito, queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Posteriormente, são apresentadas as comparações dos resultados obtidos com os modelos propostos para o cálculo da condutividade térmica e viscosidade, transferência de calor e perda de pressão.

Finalmente no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, assim como a apresentação dos possíveis desdobramentos para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo é apresentada uma detalhada e extensa revisão bibliográfica realizada ao longo do desenvolvimento do presente trabalho. Portanto, foram abordados os aspectos teóricos, conceituais e metodológicos necessários para atingir os objetivos propostos. Nesse sentido, são inicialmente apresentados conceitos e terminologias compreendidos dentro da nanociência e nanotecnologia. São descritas as principais características das nanopartículas empregadas na produção dos nanofluidos que foi parte dos objetivos de pesquisa, assim como uma contextualização histórica, desde o advento da nanotecnologia, definições e termos utilizados, potencialidades que motivam a sua aplicação, desafios a serem superados e aplicações dos nanofluidos em processos térmicos.

Dentro da revisão bibliográfica também são abordados os métodos de síntese, avaliação da estabilidade dos nanofluidos, assim como a caracterização das propriedades termofísicas (massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade). A parte final deste capítulo é dedicada ao estado da arte dos trabalhos relacionados ao desempenho da transferência de calor por convecção forçada em escoamento monofásico de nanofluidos em regime laminar e turbulento. São também compreendidos na revisão parâmetros como perda de carga, o coeficiente de atrito e potência de bombeamento para escoamento interno de nanofluidos, por serem relevantes na avaliação do desempenho termo-hidráulico na possibilidade de mensurar a potencialidade de aplicação e utilização de nanofluidos.

2.2. Nanomateriais

Recentemente, a The International Organization for Standardization (ISO) (BLEEKER, CASSEE, *et al.*, 2012) e a British Standards Institution (BSI) (PAS 71:2011, 2011) propuseram como definição para o termo científico de nanopartícula, o material ou estrutura material que possui uma ou mais dimensões periféricas na nanoescala e cuja faixa de tamanho é de aproximadamente 1 a 100 nm.

Nanopartículas e materiais nanoestruturados representam uma área de ativa e intensa pesquisa com expansão plena em muitos domínios de aplicação. Nanopartículas e materiais nanoestruturados ganharam destaque em aplicações tecnológicas devido que as suas características físico-químicas, como por exemplo o ponto de fusão, molhabilidade, condutividade elétrica e térmica, atividade catalítica, absorção de luz e miscibilidade podem ser manipuladas e ajustadas, resultando num melhor desempenho quando comparados com o mesmo material em uma escala macroscópico.

Como descrito no trabalho de (JEEVANANDAM, BARHOUM, *et al.*, 2018), as nanopartículas podem ser organizadas em quatro categorias de materiais base, (I) as nanopartículas a base de carbono, (II) as nanopartículas a base de materiais inorgânicos, (III) as nanopartículas a base de materiais orgânicos e (IV) as nanopartículas compostas ou combinadas.

2.2.1. Nanopartículas baseadas em carbono

Geralmente este tipo de nanopartículas são produzidas a base de carbono em morfologias como tubos, elipsoides ou esferas compostas de uma única ou de multiples camada de grafite. Assim, o diamante, os fulerenos (C60), os nanotubos de carbono (CNTs), as nanofibras de carbono, a fuligem, o grafeno (Gr) e as carbon onions (cebolas de carbono) estão incluídos na categoria de nanopartículas à base de carbono. A Fig. 2.1 mostra uma representação esquemática da estrutura atômica e configuração morfológicas das nanopartículas à base de carbono. A ablação a laser, a descarga de arco e a deposição química de vapor químico (CVD) são alguns dos métodos de produção importantes para a fabricação de materiais à base de carbono, com exceção do diamante e a fuligem. Segundo (KUMAR e KUMBHAT, 2016) o que torna os nanomateriais de carbono tão atraentes para comunidade científica não é apenas a grande quantidade de estruturas esteticamente agradáveis, são suas propriedades excepcionais e em muitos casos inéditas. Dentro desta categoria um tipo de nanopartícula que merece destaque são os nanotubos de carbono que foram descobertos por Iijima (1991) durante os estudos da superfície dos eletrodos de grafite

utilizados para a síntese de fulerenos e que segundo Zeng, *et al.* (2006), oferecem enormes oportunidades para o desenvolvimento de materiais completamente novos, além de ostentar propriedades mecânicas tais como rigidez, alta resistência e resiliência que superam as de qualquer material utilizado na atualidade e apresentam uma condutividade térmica superior ao do diamante. No entanto, as nanopartículas de diamante têm a possibilidade em aumentar a sua solubilidade em substâncias ou solventes orgânicos polares, facilitando o uso em dispersões coloidais. Os diamantes nanométricos atraíram o interesse das comunidades de nanociência e nanociência devido à excepcional rigidez, resistência à fratura e inércia dos filmes de diamante ultrananocristalinos, tornando estes nanomateriais exclusivos para dispositivos e sistemas mecânicos miniaturizados como descrito por (MOCHALIN, SHENDEROVA, *et al.*, 2012). Também, estão sendo adotados para muitos usos industriais, tais como o polimento, o revestimento, aditivos para lubrificantes e catalisadores devido à sua excelente estabilidade térmica e química (MARCUCCI, 2018).

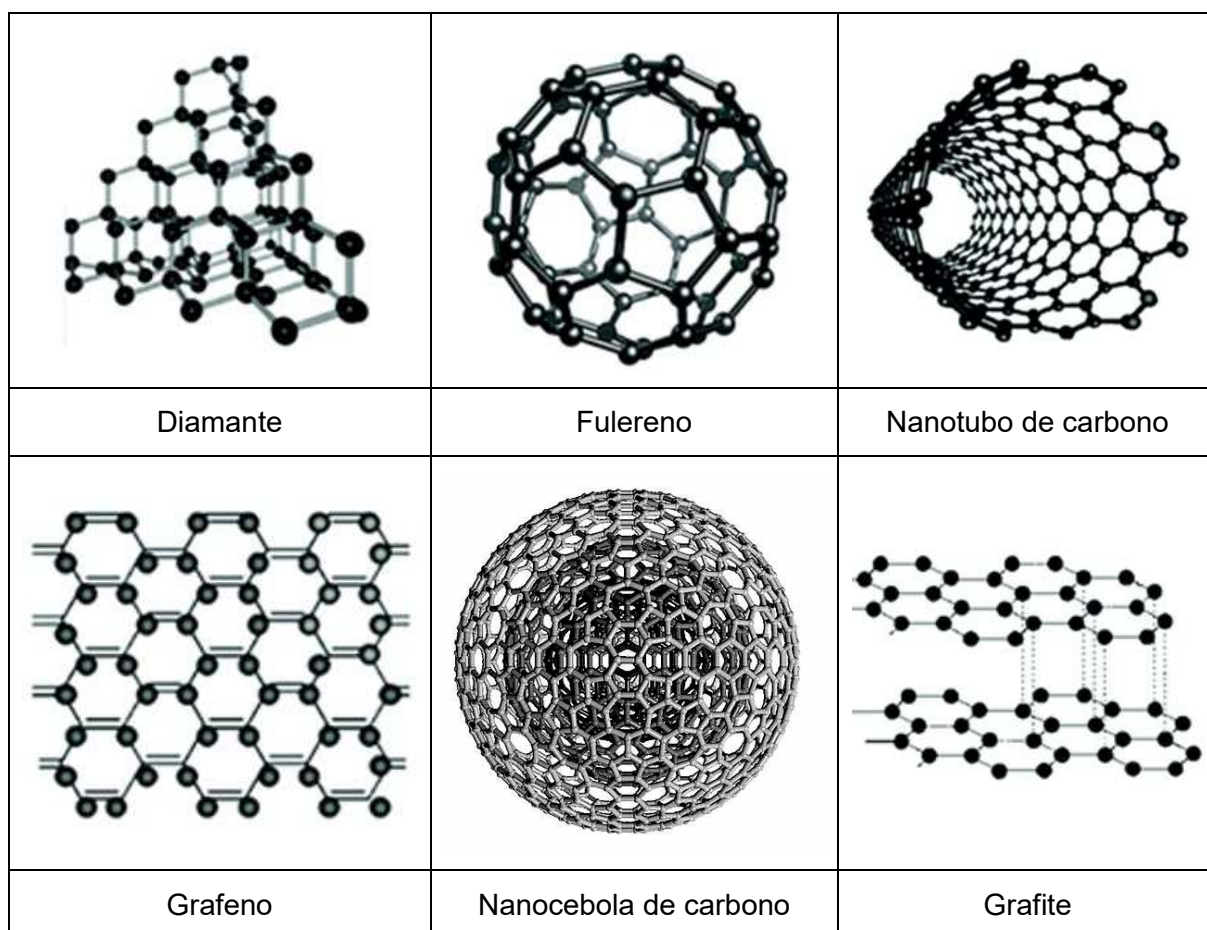


Figura 2.1- Alótropos de nanomateriais a base de carbono. Fonte: (KUMAR e KUMBHAT, 2016)

2.2.2. Nanopartículas a base de materiais inorgânicos

Esta categoria de nanopartículas incluem as nanopartículas de metal e óxidos metálicos. As nanopartículas metálicas, são geralmente definidos como partículas entre 1 e 80 nm de tamanho, que podem ser dispersas aplicando tratamentos superficiais que impedem ou diminuem a probabilidade de aglomeração. Dependendo do tratamento superficial, este tipo de nanopartículas podem ser dispersas em água ou em solventes orgânicos. O número de potenciais aplicações destas partículas está crescendo rapidamente devido uma estrutura eletrônica única, propriedades magnéticas modificáveis, áreas específicas superficiais extremamente grandes, e novos mecanismos de deformação. Um considerável conhecimento foi obtido sobre esses materiais ao longo das últimas duas décadas. Nesse sentido, os nanometais têm um enorme potencial para aplicações em eletrônica, construção, transformação de energia, armazenamento de energia, telecomunicações, medicina, catálise e proteção ambiental, com alto impacto possível nas áreas de tecnologia relacionadas à energia, saúde e materiais. Segundo (KUMAR e KUMBHAT, 2016) alguns dos nanomateriais metálicos que se apresentam como mais promissores para diversas aplicações são incluídos na Tab. 2.1.

Tabela 2.1. –Materiais de nanopartículas metálicas mais promissores

Nanomateriais metálicos	Exemplos
Metais e ligas metálicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ti, Ti-Al, liga de Ti com metais de transição (Fe, Ni, Cu); • Liga de Fe com metais de transição (Co, Ni, Cr, Cu, Zr); • Liga Fe-Cu-Nb-Si-B; • Al, liga de Al com metal de transição (Fe, Ni, Ti, Zr); • Mg, liga Mg-Ni; Liga de Mg-Al
Pó de nanometais nobres	Ag, Au, Pt, Pd

Fonte: (KUMAR e KUMBHAT, 2016)

Uma característica importante das nanopartículas metálicas é que as suas propriedades podem ser sistematicamente manipuladas ajustando-se o tamanho, a composição e a forma como pode ser observado num exemplo mostrado na fig. 2.2, onde nanopartículas de prata dependendo do tamanho, forma e aglomeração das partículas modificam a dispersão da luz.

Por outro lado, as nanopartículas de óxidos metálicos de transição e não-transição são também um dos tipos de nanomateriais muito importantes. Deste tipo de nano partículas podem ser destacados TiO_2 e ZnO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2 , semicondutores tais como

silício, SiO_2 e materiais inorgânicos não óxidos como nitreto de alumínio, nitreto de silício, nitreto de titânio, carbonitreto de titânio, carboneto de tungstênio e sulfeto de tungstênio (GIORDANO, ERPEN, *et al.*, 2009), (AJIBADE e MBESE, 2014).

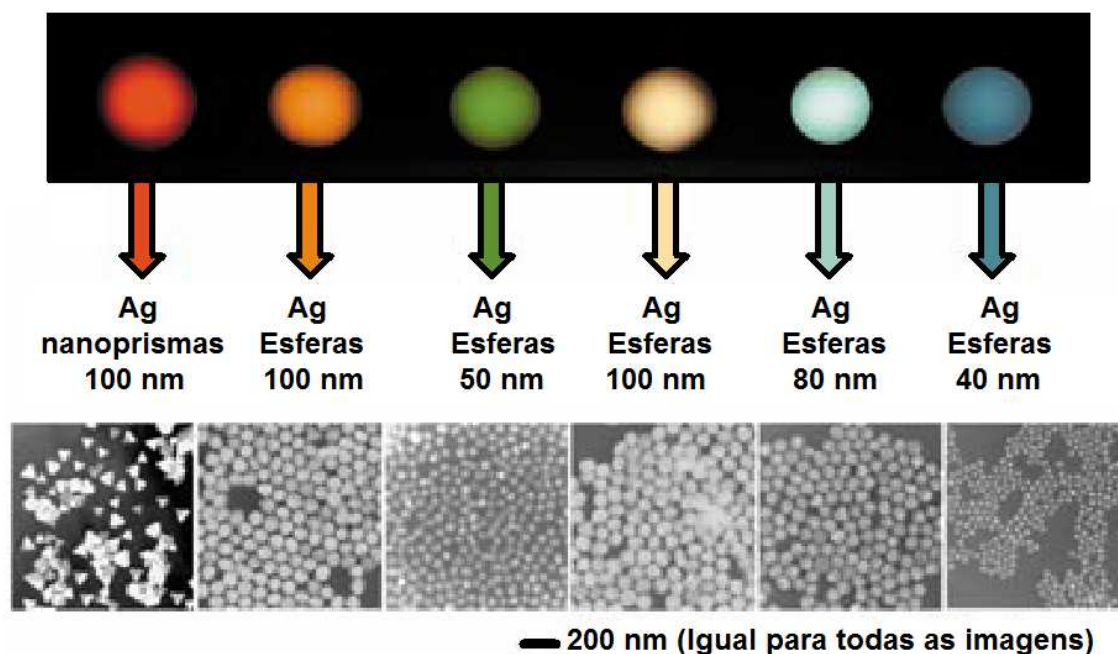


Figura 2.2 - Influência do tamanho, forma e composição na dispersão da luz e nas cores resultantes das nanopartículas de prata (os tamanhos das nanopartículas são todos aproximados). Fonte: (MIRKIN, 2005)

2.2.3. Nanopartículas a base de materiais orgânicos

No contexto das nanomateriais orgânicos são as nanopartículas de polímeros as predominam neste campo. Os materiais nanopoliméricos podem ser obtidos na forma de partículas esféricas, tubos ou bastões. A importância deste nanomateriais é capacidade de se transformar em estruturas desejadas, fibras e estruturas ramificadas conhecidas como dendrímeros, micelas ou lipossomas. Nanotubos, nanofios e nanobastões de polímeros têm aplicações potenciais em dispositivos eletrônicos, magnéticos, ópticos, optoeletrônicos e micromecânicos. Um dos promissores nanotubos poliméricos são os nanotubos de polianilina (PANI), que apresentam boa condutividade térmica e podem ser utilizados em tecidos condutores.

2.2.4. Nanomateriais compostos ou nanopartículas combinadas.

Os nanomateriais compostos são partículas na dimensão da nanoescala produto da combinação entre nanopartículas de diferentes materiais ou nanopartículas combinados com maiores estruturas de matéria por exemplo, as nanofibras híbridas ou estruturas mais complexas. Como descrito por (QI, CAO e ZIENE, 2014), este tipo de compósitos conhecidos

também como nanopartículas híbridas podem resultar de qualquer combinação de nanopartículas a base de carbono, a base de metal ou a base de materiais orgânicos dependendo da aplicação desejada.

Uma aplicação deste tipo de compósitos foi apresentado no trabalho de (VAN BERKEL e HAWKER, 2010) onde obtiveram nanopartículas híbridas de metal nobre (Au) e poli (divinil benzeno) através da técnica de miniemulsão. O resultado deste processo pode ser observado na fig. 2.3. A modificação superficial das nanopartículas metálicas com cadeias poliméricas é fundamental para o sucesso da incorporação de nanopartículas de metal em solventes polares, como por exemplo o tetrahidrofurano.

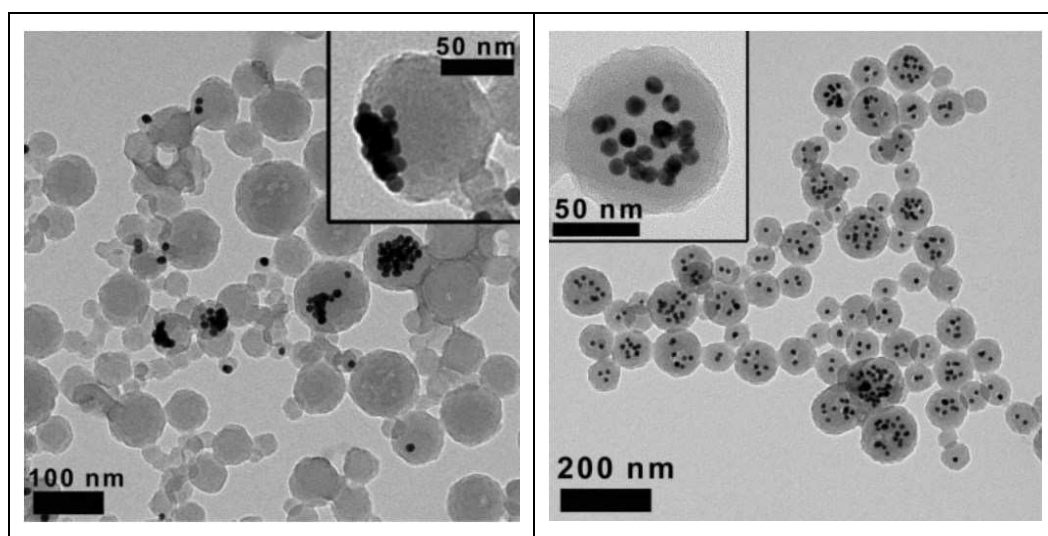


Figura 2.3 - Micrografia eletrônica de transmissão representativa de compósito de nanopartículas de polímero-ouro, apresentando nanopartículas de ouro de 13 nm encapsuladas dentro de nanopartículas esféricas maiores de poli (divinilbenzeno).

2.3. Nanofluidos

2.3.1. Contexto Histórico

A obtenção de sistemas energeticamente eficientes, é um dos desafios científicos mais importantes para o desenvolvimento tecnológico dos processos industriais que se aplicam em diversas áreas como, por exemplo, a indústria aeroespacial, automotiva, telecomunicações, manufatura de grande escala, eletrônica ou naval entre outras. O desenvolvimento e a evolução da tecnologia associado com o gerenciamento energético das fontes renováveis e não renováveis de energia, exigiu métodos mais eficientes de transferência de calor (SAJID e ALI, 2019) . Nesse sentido, todos os processos que envolvem a transferência de calor como

meio de gerenciamento energético, apresentam uma tendência crescente de pesquisa para o desenvolvimento de novas aplicação que possibilitem o aumento de eficiência energética.

A intensificação dos processos de transferência de calor para obter sistemas energeticamente eficientes, pode ser conseguida por intermédio da aplicação das chamadas técnicas ativas que requerem da aplicação de energia externa para modificar condições do processo e as técnicas passivas que não requerem da aplicação de energia externa. Segundo Bergles (2002) a eficácia dos dois tipos de técnicas depende em grande medida de parâmetros associados com a transferência de calor, que pode variar devido as características do processo, como temperatura de operação, regimes de escoamento ou as condições de contorno do processo.

Técnicas ativas, como a aplicação de vibração das superfícies de troca, aplicação de campos eletrostáticos, sucção ou injeção, são alguns dos métodos utilizados para intensificar o processo de transferência de calor, porem resulta em uma demanda de energia que pode ser significativa na hora de verificar a eficiência global do sistema, além de favorecer ao incremento de tamanho do sistema, tornando mais onerosa e difícil a sua sustentabilidade. Técnicas passivas, como manipulação das geometrias e materiais da superfície de troca dos trocadores de calor, assim como aplicação de superfícies rugosas e dispositivos que aumentem a área de troca ou que tornem o escoamento turbulento, tem apresentado resultados importantes. Nesse sentido, um número significativo de trabalhos (SATISH, GRANDE e WILLIAM, 2003), (AMBEKAR, R., *et al.*, 2016) ao estudo de trocadores com diferentes configurações, várias geometrias, e parâmetros que influenciam fatores estruturais na redução de dimensões globais, o aumento de eficiência térmica e a redução de perdas hidráulicas.

Contudo, as mudanças das geometrias, dos matérias e dos dispositivos empregados para obter maior eficiência, os sistemas térmicos podem apresentar ainda um maior potencial de aprimoramento, que é limitado, em parte pelo pelas propriedades térmicas dos fluidos de arrefecimento convencionais como água, óleos térmicos ou etileno glicol. Um exemplo disso pode ser notado na condutividade térmica da água que é aproximadamente 0,59 W/mK (para $T=25^{\circ}\text{C}$, $P=100\text{kPa}$), superior à de todos os fluidos térmicos que se utilizam hoje em dia, sendo quase duas ordens de grandeza inferior à condutividade térmica de muitos metais e óxidos metálicos.

Historicamente, a utilização de partículas sólidas dispersas nos fluidos convencionais de transferência de calor como um aditivo a fim de modificar suas propriedades termofísicas foi introduzida por Maxwell (1873). Entretanto, todos os estudos realizados em grande parte do século XX, foram considerados como aditivos apenas partículas com dimensões

micrométricas, mas, como descrito por Hoffmann (2014), estas dispersões apresentavam uma série de desvantagens como, sedimentação, obstrução, desgaste, perda de carga que interferiam com o escoamento, a estabilidade da mistura e em consequência com a vida útil dos aparelhos onde se aplicariam sendo assim inviável sua utilização.

No entanto, a estratégia de melhorar a transferência de calor dos processos térmicos intensificando as propriedades termofísicas dos fluidos convencionais continuou sendo objeto de pesquisa para a comunidade científica, já que propriedades como a condutividade térmica é crucial para desenvolvimento de equipamentos energeticamente eficientes.

O avanço da ciência, tecnologia e o advento da nanotecnologia, possibilitou a eventual chance de sintetizar materiais na escala nanométrica. Assim, novas iniciativas surgiram que buscavam a intensificação das propriedades térmicas dos fluidos de trabalho como a relatada por Masuda, *et al.* (1993) onde partículas sólidas ultrafinas de Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , foram dispersas em água, por intermédio da aplicação da técnica de repulsão eletrostática, apresentando um aumento da condutividade na dispersão proporcional à concentração. Estas partículas ultrafinas, com dimensões compreendidas entre 1 e 100 nanômetros (*nm*) ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$), que ao serem dispersas em fluidos convencionais de arrefecimento como água, óleos ou etileno glicol, surgiu o conceito inovador de “Nanofluidos” como foi denominado por Choi (1995).

2.3.2. Características gerais

Os nanofluidos têm atraído grande interesse da comunidade científica, principalmente, pela potencialização de suas propriedades termofísicas. Após Choi (1995), ter proposto os nanofluidos como uma nova geração de fluidos de arrefecimento 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 são apresentados o número de publicações e as áreas objeto da pesquisa em artigos científicos desde o ano 2010, segundo dados publicados no portal Elsevier.

Mas, o que torna os nanofluidos um campo promissório de desenvolvimento tecnológico na área da engenharia térmica são certamente os importantes ganhos na condutividade térmica deste tipo de dispersão coloidal. Trabalhos pioneiros realizados por Eastman, *et al.* (2001) e Choi, *et al.* (2001) onde mostraram que a condutividade térmica da dispersão de nanopartículas de Cu em etileno glicol e de nanotubos de carbono em óleo, ambas com uma fração de volume de menos de 1%, aumentou 40% e 150%, respectivamente, em comparação com o fluidos base. Outros pesquisadores contemporaneamente como Lee, *et al.* (1999), Xuan e Li (2000) e Xuan e Roetzel (2000) obtiveram incrementos significativos (maiores que

20%) da condutividade térmica, com baixas concentrações em volume de nanopartículas (menores que 5%).

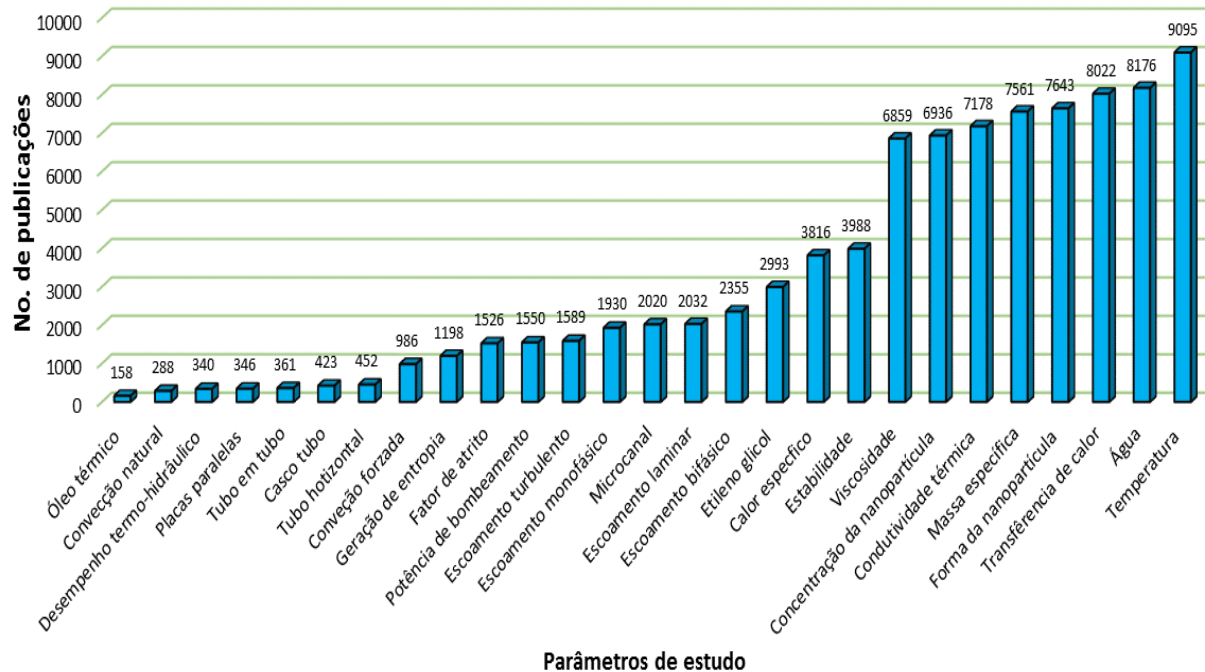


Figura 2.4 - Número de publicações por área temática (Fonte dos dados: Portal Elsevier)

As vantagens que apresentam as dispersões com nanopartículas, em comparação com dispersões convencionais de partículas de dimensões milimétricas ou micrométricas, é que o uso de nanopartículas, não só incrementa as propriedades de transferência de calor do fluido base, mas, também aumenta a estabilidade da dispersão, reduz a sedimentação e a obstrução dos canais de fluxo o que reduz o incremento na queda de pressão. Wang e Mujumdar (2007). Estas vantagens ou benefícios mencionados no trabalho de Hoffmann (2014) são principalmente em virtude que a dispersão de nanopartículas em baixas concentrações pode aumentar significativamente a condutividade térmica do fluido base, os problemas relativos à sedimentação, abrasão e entupimento são reduzidos quando comparados com suspensões convencionais de partículas micrométricas, assim, como consequência para atingir ganhos significativos na transferência de calor o incremento da potência de bombeamento necessária para escoar o fluido é minimizada.

Para Li, *et al.* (2009), todas as nanopartículas sólidas com alta condutividade térmica podem ser utilizadas como aditivos para nanofluidos. Geralmente, a condutividade térmica dos sólidos é normalmente mais elevada do que a dos líquidos, conforme ilustrado pela Tab. 2.2. As nanopartículas relatadas na literatura, que têm sido frequentemente utilizadas para preparar nanofluidos são: nanopartículas a base de carbono, a base de materiais inorgânicos

e orgânicos, as nanopartículas híbridas sendo comumente utilizados com fluidos base a água, óleo térmico, acetona, deceno e etileno glicol.

Tabela 2.2 - Condutividade térmica de aditivos e fluidos base utilizados na preparação de nanofluidos.

Materiais	Símbolos	Condutividade Térmica [W/m.K]
Materiais metálicos		
Cobre	Cu	401
Prata	Ag	426 - 428
Ouro	Au	317 - 318
Alumínio	Al	237
Ferro	Fe	83,5
Materiais não metálicos		
Óxido de alumínio (Alumina)	Al ₂ O ₃	36 - 40
Oxido de zinco	ZnO	116
Oxido de cobre	CuO	69 - 76,5
Carbeto de silício	SiC	270 - 490
Silício	Si	148
Nanotubos de carbono	MWNTC	~3000
	SWNTC	~6000
Nanotubos de nitreto de boro	BNNTs	260 - 600
Diamante	C	~2300
Fluidos base		
Água	H ₂ O	0,613
Etileno Glicol	EG	0,253
Óleo de motor	EO	0,145
Polialfaolefina	PAO	0,142

Fonte: Li, *et al.* (2009).

No entanto, Keblinski, *et al.* (2005), menciona que alguns dos resultados experimentais obtidos com nanofluidos são controversos, já que algumas vezes, excede em muito as previsões de modelos teóricos bem estabelecidas para determinar propriedades termofísicas. Autores como (SEZER, ATIEH e KOÇ, 2019), atribuíram que o aumento das discrepâncias nos resultados das propriedades térmicas está diretamente ligado ao aumento do número de publicações de pesquisas que foram realizadas sem estabelecer critérios padrões para a produção de nanofluidos e a medição das suas propriedades termofísicas. Eles listaram uma série de fatores ou variáveis do processo de produção de nanofluidos que são descritos na Fig. 2.5, e que podem influenciar nas propriedades termofísicas da mistura.

Nesse sentido, é necessário realizar novas experiências, que descrevam a detalhe os fatores preponderantes na síntese de nanofluidos e caracterização adequada das propriedades termofísicas, com intuito de favorecer à aplicação desta tecnologia que possibilitem o desenvolvimento de novos equipamentos energeticamente mais eficientes.

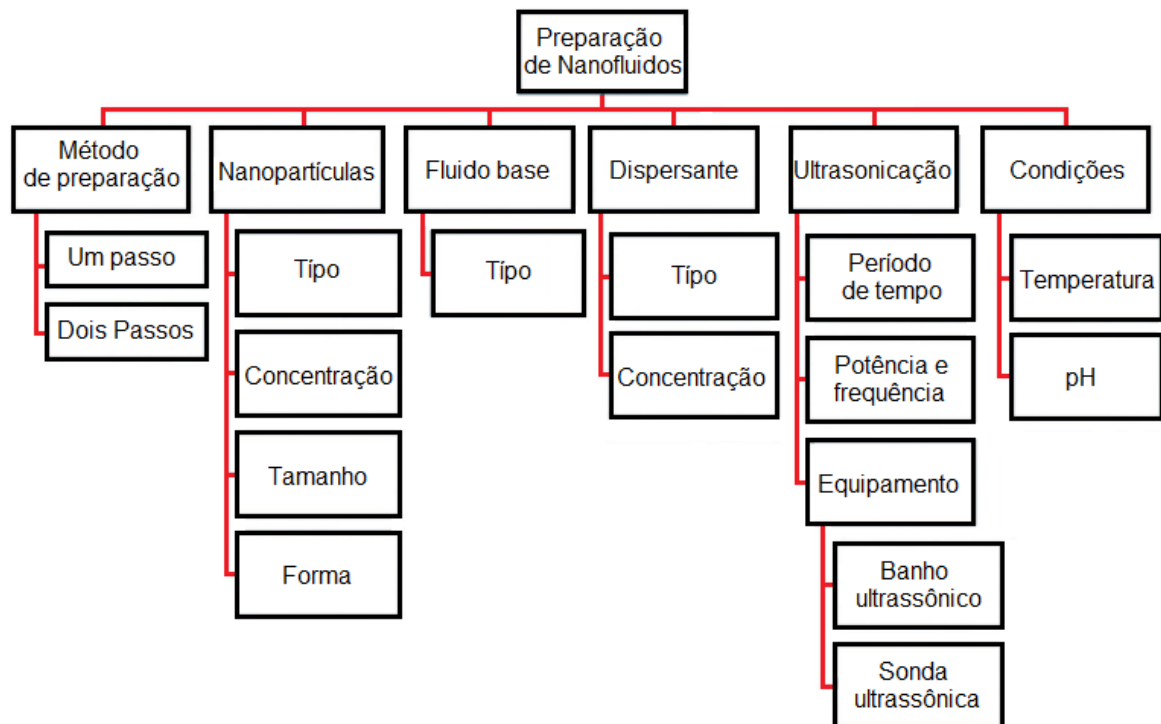


Figura 2.5 – Variáveis na produção de nanofluidos. Fonte: (SEZER, ATIEH e KOÇ, 2019)

2.3.3. Preparação de nanofluidos

Autores como (WU, ZHU, *et al.*, 2009), (GHADIMI, SAIDUR e METSELAAR, 2011) (DEVENDIRAN e AMIRTHAM, 2016), coincidem em preparação de nanofluidos estáveis é o primeiro passo e é o ponto chave da pesquisa e aplicação de nanofluidos. Nesse sentido, é uma operação delicada, não sendo, portanto, só uma simples mistura sólido-líquido.

(WU, ZHU, *et al.*, 2009), também descreveu que a estabilidade dos nanofluidos possui vários aspectos que tem que ser considerados: 1) estabilidade cinética: as nanopartículas dispersas nos nanofluidos apresentam fortes movimentos brownianos. Os movimentos estocásticos das nanopartículas podem compensar a sedimentação causada pelo campo gravitacional; 2) estabilidade da dispersão: Devido à agregação de nanopartículas, a dispersão de nanopartículas em fluidos pode-se deteriorar com o tempo; e 3) estabilidade química. Nenhuma reação química entre nanopartículas suspensas ou entre o fluido base e as nanopartículas é desejada nos nanofluidos. A última estabilidade depende da compatibilidade entre as nanopartículas e fluidos nas condições de operação. Portanto, existem dois fenômenos que são críticos para a estabilidade de um nanofluido, a agregação de nanopartículas e sedimentação, que seus efeitos são muito mais sensíveis quando os fluidos operam em condições de estagnação. O efeito da degradação de uma dispersão coloidal por causa da sedimentação foi inicialmente estudado por (HIEMENZ e DEKKER, 1997). Eles afirmaram que em estado estacionário, a velocidade de sedimentação de

pequenas partículas esféricas num líquido pode ser modelada segundo a lei de Stokes, onde o modelo matemático que representa um equilíbrio entre a gravidade, a força de empuxo e a força de atrito que estão atuando nas nanopartículas suspensas é descrito na Eq. 2.1.

$$V = \frac{2 \cdot r_{np}^2}{9 \cdot \mu_{fb}} \cdot (\rho_{np} - \rho_{fb}) \cdot g \quad (2.1)$$

Onde V é a velocidade de sedimentação das partículas; (r_{np}) é o raio das nanopartículas esféricas; (μ_{fb}) é a viscosidade do meio líquido; (ρ_{np}) e (ρ_{fb}) são a massa específica das nanopartículas e do fluido base respectivamente e (g) é a aceleração gravitacional. Nesse sentido, de acordo com a equação 2.1, e em conformidade com (GHADIMI, SAIDUR e METSELAAR, 2011) para diminuir a velocidade de sedimentação de nanopartículas em nanofluidos e maximizar a estabilidade dos nanofluidos podem ser realizados três procedimentos: 1) aumentar a viscosidade do fluido base; 2) minimizar a diferença entre a massa específica das nanopartículas e a do fluido base e 3) utilizar nanopartículas de menor tamanho possível, já que, quando o tamanho das partículas é reduzido até um tamanho crítico, (r_c) , interrompe processo da sedimentação devido ao movimento browniano das nanopartículas como descrito por (WU, ZHU, et al., 2009). No entanto, as nanopartículas de menores tamanhos possuem uma maior área superficial, aumentando assim a possibilidade de agregação de nanopartículas. Portanto, deve existir um balanço entre a redução do tamanho das nanopartículas e o efeito de agregação.

Quando se fala de dispersões de nanopartículas em fluidos base (água, óleos ou etileno glicol), os fenômenos físicos e químicos próximos da escala atômica, são relevantes, sendo a preparação dos nanofluidos um passo fundamental que exige tratamento específico. Por conseguinte, diversos autores tem dedicado seus esforços em propor técnicas e métodos de dispersão de nanopartículas. Portanto existem basicamente duas técnicas utilizadas para dispersar nanopartículas nos fluidos base: O método de um passo (do inglês, *One-Step Method*) e o método de dois passos (do inglês, *Two-Step Method*)

Método de um passo

O método de um passo consiste em produzir e dispersar simultaneamente as partículas em um fluido por deposição física de vapor (PVD). O enfoque da vaporização direta foi primeiramente desenvolvido por Akoh, *et al.* (1978) e foi chamado de técnica VEROS (do inglês, *Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate*). A ideia original deste método foi a produção de nanopartículas, entretanto, era muito difícil separar posteriormente as

partículas do fluido para produzir partículas secas. Uma modificação da técnica VEROS foi proposta por Wagener, *et al.* (1996). Eles utilizaram pulverização catódica com magnetron em altas pressões para a preparação de suspensões de partículas metálicas de prata (Ag) e ferro (Fe). Eastman, *et al.* (2001) desenvolveram uma modificação da técnica VEROS, no qual vapor de Cu é condensado diretamente em nanopartículas por contato com um líquido de baixa pressão de vaporização (Etileno Glicol) que está escoando. Lo, *et al.* (2005), sintetizaram nanopartículas para preparar nanofluidos de CuO, Cu₂O e Cu com diferentes fluidos dielétricos como fluido base. A técnica que eles utilizaram foi um sistema de sínteses de nanopartículas por arco submerso no vácuo “vacuum-SANSS (do inglês, *Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System*)”. Lo, *et al.* (2005) aplicaram a mesma técnica na produção de nanofluidos de prata (Ag) e níquel (Ni), já que a técnica “SANSS” tinha demonstrado ser eficaz na produção e distribuição uniforme de nanopartículas, evitando as aglomerações e controlando o tamanho das nanopartículas CuO, dispersos em água deionizada. Outros trabalhos que aplicaram o método de um passo na preparação de nanofluidos foram (PATEL, DAS, *et al.*, 2003), (ZHU, LIN e YIN, 2004), (BÖNNEMANN, BOTH, *et al.*, 2005) e (LIU, LIN, *et al.*, 2006)

As principais vantagens que apresenta o método de um passo é que são evitados os processos secagem, armazenamento, transporte, e dispersão de nanopartículas de modo que a aglomeração das nanopartículas é minimizada, e a estabilidade do fluido é aumentada. No entanto, este método tem como característica que o nanofluido é produzido por lotes, o que dificulta o controle de parâmetros importantes como concentração, quantidade do produto, o tamanho da nanopartícula, razões pelas quais limitam sua viabilidade comercial e impedem com que método de um passo seja o principal método de produção de nanofluido, Li *et al.* (2009)

Método de dois passos

Conforme descrito por (SEZER, ATIEH e KOÇ, 2019) o método de dois passos é amplamente utilizado na síntese e produção de nanofluidos considerando que existe uma disponibilidade comercial de diferentes tipos de nanopartículas. Portanto, a vantagem deste método é a maior capacidade de produção e a possibilidade de controlar parâmetros como a concentração. Neste método, as nanopartículas são inicialmente sintetizadas em forma de pó seco ultrafino, aplicando o processo de condensação de gás inerte IGC (do inglês, *Inert Gas Condensations*) e, em seguida, são dispersas nos fluidos base, empregando energia externa extra, que pode ser fornecida com ajuda da agitação intensiva por força magnética, agitação ultrassônica, mistura de alto cisalhamento, ou homogeneização por alta pressão.

Uma vez que as técnicas para sintetizar nanopartículas foram estendidas nos níveis de produção industrializada, o método de dois passos tornou-se um método econômico para produzir nanofluidos em grande escala (WANG e MUJUMDAR, 2008). Devido à alta superfície efetiva de contato das nanopartículas, estas tendem a aglomerar-se. O problema da aglomeração é devido às forças intermoleculares de Van Der Waals entre as nanopartículas, sendo o principal obstáculo na elaboração de nanofluido por meio deste método. Não obstante, o problema está sendo contornado com a aplicação de tratamentos químicos na superfície de contato das nanopartículas, os quais empegam baixas concentrações de tensoativos ou surfactantes. O propósito é reduzir os efeitos das forças intermoleculares e aumentar a estabilidade da dispersão. No entanto, a funcionalidade dos agentes tensoativos para aplicações em alta temperatura é também uma grande preocupação (ARSHAD, JABBAL, *et al.*, 2019).

Na literatura tem se reportado um grande número de trabalhos cujo método de preparação de nanofluidos empregado foi o método de dois passos. Por exemplo, Eastman, *et al.* (1996), Lee, *et al.* (1999) e Wang, *et al.* (1999) usaram o método de dois passos para produzir nanofluidos de alumina (Al_2O_3). Xuan e Li (2000) usaram nanopartícula de cobre (Cu) disponíveis comercialmente para preparar nanofluidos em dois fluidos base diferentes água e óleo de transformador. Murshed, Leong e Yang (2005) preparam uma dispersão de TiO_2 -água com a aplicação do mesmo método. Kwak e Kim (2005) empregaram o método de dois passos para preparar nanofluidos de uma dispersão de nanopartículas de CuO em etileno glicol (EG), sem aplicação de dispersantes. Autores (HWANG, LEE, *et al.*, 2007) dispersaram nanopartículas de diferente natureza (MWCNT, fulerenos, CuO, SiO_2) em diferentes fluidos base (água, óleo mineral e etileno glicol) utilizando o método de dois passos com auxílio de um sonificador.

Oliveira (2012) realizaram dispersões de nanopartículas de prata (Ag) em água destilada com ajuda de um homogeneizador a alta pressão, onde a quebra das aglomerações é resultado da indução de altas taxas de cisalhamento. O sistema que foi utilizado possui dois pistões que pressurizam a mistura líquido-nanopartícula, fazendo com que este passe forçosamente por canais estreitos, que orientam a mistura dentro de uma câmara comum, onde a velocidade do líquido é aumentada.

(KUMAR, TIWARI e GHOSH, 2016) e (VERMA, TIWARI e CHAUHAN, 2017) aplicaram o método de dois passos para produzir nanofluidos a base de água com diferentes tipos de nanopartículas (TiO_2 , Al_2O_3 , ZnO, CeO_2 , $(\text{Cu}+\text{Al}_2\text{O}_3)$, Grafeno e MWCNT) para avaliar o desempenho da transferência de calor em coletores solares de placas plana. Uma vez que características como geometria, tamanho, pureza e qualidade dos nanotubos tenham sido

controladas, estes poderão ser dispersos num fluido base com ou sem uso de surfactantes Keblinski, *et al.* (2005).

O método de dois passos também pode ser usado para produzir nanofluidos utilizando em nanopartículas a base de carbono. (CÁRDENAS GÓMEZ, HOFFMANN e BANDARRA FILHO, 2015), aplicando o processo de homogeneização por alta pressão obtiveram dispersões de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT) em água como fluido base. (FONTES, RIBATSKI e BANDARRA FILHO, 2015), realizaram um estudo experimental das propriedades termofísicas dos de nanofluidos a base de óleo mineral. Eles utilizaram nanopartículas de nanotubo de carbono de parede múltipla e nanopartículas de diamante. As nanopartículas foram dispersas no óleo do transformador através de um homogeneizador de alta pressão (até 400 bar).

(CÁRDENAS, PAZ e BANDARRA FILHO, 2017) Produziram nanofluidos de nanotubo de carbono de parede simples (SWCNT) e prata (Ag) pelo método de dois passos, os nanofluidos produzidos por eles resultaram visualmente homogêneos e com tempos de estabilidades superiores aos dois meses. (OLIVEIRA, CÁRDENAS CONTRERAS e BANDARRA FILHO, 2017) e (CÁRDENAS CONTRERAS, OLIVEIRA e BANDARRA FILHO, 2019), aplicaram o método de dois com o auxílio do homogeneizador de alta pressão para dispersar nanopartículas a base de carbono como grafeno e nanotubos de carbono em uma misturas de etileno glicol e água, os nanofluidos apresentaram estabilidade visual após uma semana de produzidos. (HWANG, LEE, *et al.*, 2008), estudaram, o efeito da estabilidade na produção de nanofluidos aplicando método de dois passos com a utilização de diferentes processos de mistura de partícula. A análise utilizada consistiu em verificar a distribuição de tamanho das nanopartículas dispersas nos fluidos base. Foram utilizadas nanopartículas de carbono (CB Carbon black) dispersas em água, e nanopartículas de prata (Ag) dispersas em óleo de silicone, como pode ser observado nas Figs. 2.6a e 2.6b respectivamente.

Inicialmente, (a) nenhum tratamento físico foi utilizado para dispersar as nanopartículas dentro dos fluidos base. Neste caso, o diâmetro médio dos aglomerados de nanopartículas de (CB) e (Ag) foram de 585 nm e 335 nm, respectivamente. Depois de utilizar, (b) um agitador; (c) o banho ultrassônico; (d) a sonda ultrassônica e (e) homogeneizador de alta pressão, os diâmetros médios dos aglomerados de nanopartículas nos nanofluidos de CB foram de 182 nm, 147 nm, 66 nm e 45 nm, respectivamente. Por outro lado, os diâmetros médios dos aglomerados de nanopartículas nos nanofluidos de prata (Ag) foram 150 nm, 90 nm, 40 nm e 35nm, respectivamente.

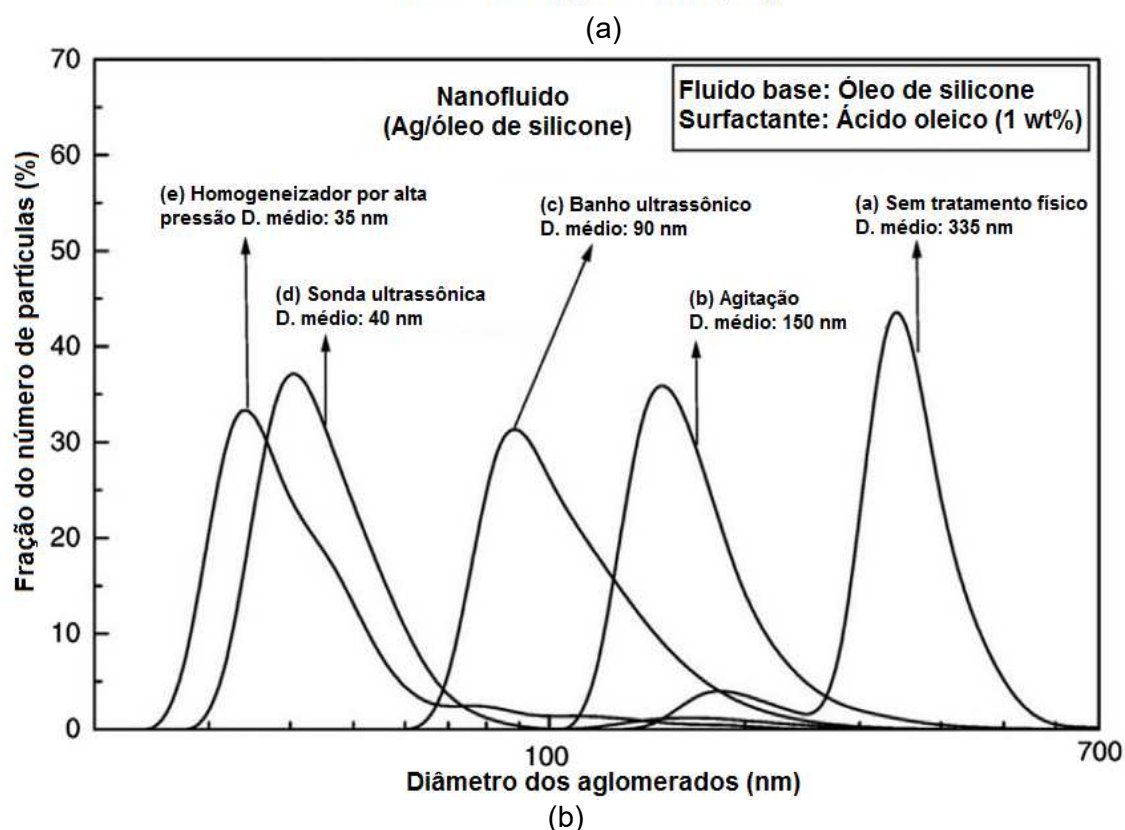
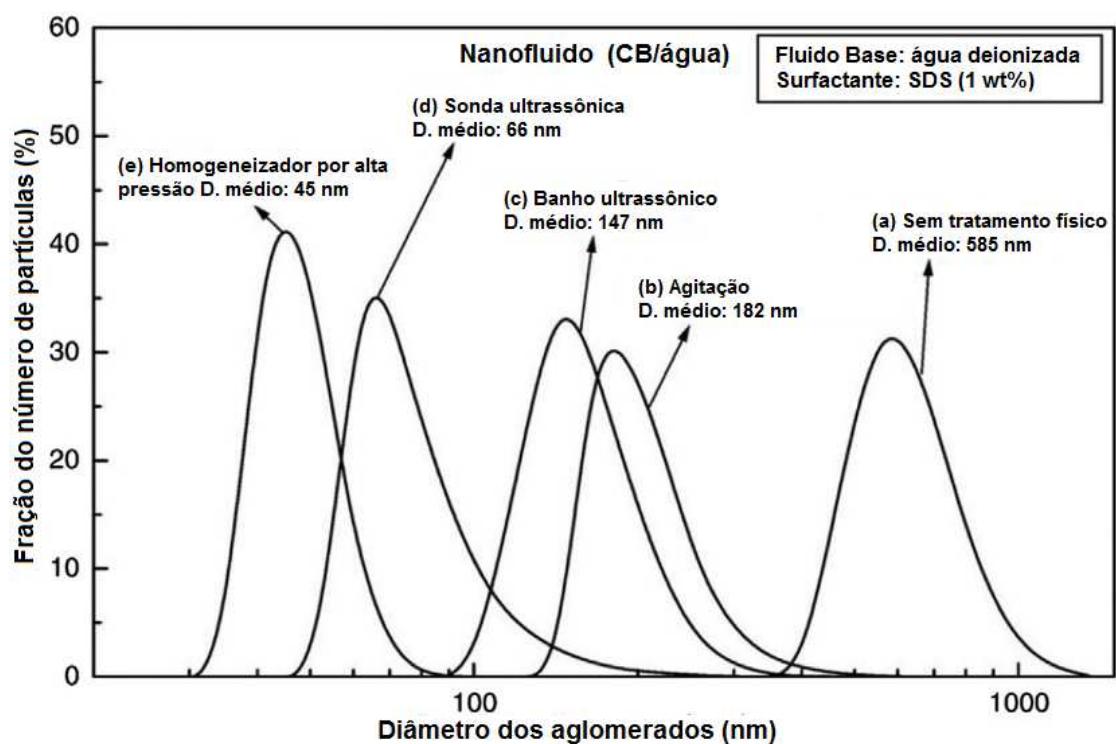


Figura 2.6 - Distribuições de tamanho de partículas em nanofluidos em função dos métodos de dispersão. (a) CB/água (b) Ag/óleo de silicone. Fonte: Adaptado de (HWANG, LEE, *et al.*, 2008)

Portanto, pode-se concluir das Figs. 2.6 a e 2.6b que a homogeneização de alta pressão e a sonicação direta com sonda ultrassônica são os métodos mais eficazes na dispersão de nanopartículas nos fluidos base. No entanto, devido ao elevado custo, tamanho e elevada quantidade de volume de fluido base p requerida para a produção, os homogeneizadores de alta pressão não são os mais escolhidos pelos pesquisadores (MAHBUBUL, 2019). Nesse sentido, o processo por ultrassônica é amplamente utilizado devido a seu preço razoável, o tamanho compacto, e o controle da quantidade de material necessário na produção de nanofluidos.

Comparação ente o método de um passo e o método de dois passos

Ambos os tipos de métodos de preparação de nanofluidos possuem vantagens e desvantagens. No entanto, é importante enfatizar que uma grande quantidade de trabalhos produz nanofluidos aplicando o método de dois passos. Por outro lado, em termos de estabilidade e uma alta qualidade de dispersão o método de um passo resulta ser o mais confiável, porém, uma menor quantidade de nanofluido pode ser obtiva quando comparado ao método de dois passos (MAHBUBUL, 2019). Isto pode ser visto no trabalho realizado por (LEE, PARK e BANG, 2012). Eles compararam a dispersão e estabilidade de nanofluidos de CuO à base de água deionizada com uma concentração de nanopartículas de 0,001% em volume pelos métodos de um passo e de dois passos. Eles verificaram os tamanhos médios das nanopartículas utilizando imagens obtidas pelo MET (Microscópio eletrônico de transmissão), e mediram o potencial zeta e o pH dos nanofluidos preparados. Os resultados podem ser observados na Tab. 2.3, mostrando que a estabilidade do nanofluido preparado pelo método de um passo era muito superior ao do nanofluido preparado pelo método dos dois passos.

Tabela 2.3 – Tamanho das nanopartículas, potencial zeta e pH de dois nanofluidos segundo o método de produção

Propriedades	Um passo	Dois passos
Tamanho médio das nanopartículas (nm)	15	55
Potencial Zeta	39	15,8
pH	7,6	7,15

Fonte: Tabela editada de (LEE, PARK e BANG, 2012)

Na Tab. 2.4 são apresentados os nanofluidos produzidos por alguns pesquisadores, descrevendo características como métodos empregados na sintetização dos nanofluidos, o tipo de nanofluido, concentração e tamanho das nanopartículas.

Tabela 2.4- Sínteses de nanofluidos reportados na literatura

Autor	Nanofluido	Método utilizado	ϕ (%)	Tamanho da partícula (nm)
Eastman, <i>et al.</i> (2001)	Cu/EG	Um passo	0,3	10
(PATEL, DAS, <i>et al.</i> , 2003),	Au/Água Ag/Água	Um passo	0,0026- 0,001	10-20 60-80
(ZHU, LIN e YIN, 2004)	Cu/EG	Um passo	0,1-0,3	10
(BÖNNEMANN, BOTHA, <i>et al.</i> , 2005)	Ag/Óleo	Um passo	0,001-0,3	10
Lo, <i>et al.</i> (2005a)	CuO/Água Cu ₂ O/Água Cu/Água	Um passo	[-]	49.1
Lo, <i>et al.</i> (2005b)	Ni/Água	Um passo	[-]	10
(LIU, LIN, <i>et al.</i> , 2006)	Cu/Água	Um passo	<0,2	75-100
Zhu, <i>et al.</i> (2007)	Fe ₃ O ₄ /Água	Um passo	4	10
Eastman, <i>et al.</i> (1996)	CuO/Água CuO/Óleo Al ₂ O ₃ /Água	Dois passos	<5	36 36 <3
Lee, <i>et al.</i> (1999)	Al ₂ O ₃ /Água Al ₂ O ₃ /EG CuO/Água CuO/EG	Dois passos	<4	24 24 18 18
Wang, <i>et al.</i> (1999)	Al ₂ O ₃ /Água Al ₂ O ₃ /Óleo Al ₂ O ₃ /EG CuO/Água CuO/EG	Dois passos	5,5 7,4 8 9,7 14,8	28 28 28 23 23
Xuan e Li (2000)	Cu/Água Cu/Óleo	Dois passos	5 7,5	100
Murshed, <i>et al.</i> (2005)	TiO ₂ /Água	Dois passos	5	15 10-40
Kwak e Kim (2005)	CuO/EG	Dois passos	0,2	10-30
(HWANG, LEE, <i>et al.</i> , 2007)	Fulerenos/óleo Fulerenos/Água MWCNT/óleo MWCNT/Água SiO ₂ /Água CuO/Água CuO/EG	Dois passos	1,5-5 <0,5 0,5-1,5 0,2-1 1 1 1	10 10 L=(10-50)*10 ³ D=(10-30) 12 33 33
Oliveira (2012)	Ag/Água	Dois passos	<1	10-20

Continua na página seguinte.

Autor	Nanofluido	Método utilizado	ϕ (%)	Tamanho da partícula (nm)
(CÁRDENAS GÓMEZ, HOFFMANN e BANDARRA FILHO, 2015)	MWCNT/Água	Dois passos	0,12-0,24	$L=(10-30)*10^3$ $D=(20-40)$
(FONTES, RIBATSKI e BANDARRA FILHO, 2015)	MWCNT/óleo	Dois passos	0,005-0,05	$L=(10-30)*10^3$ $D=(20-40)$
	Diamante/óleo			10
(KUMAR, TIWARI e GHOSH, 2016)	TiO ₂ /Água	Dois passos	0,5-1,25	44
	Al ₂ O ₃ /Água			45
	ZnO/Água			[-]
	CeO ₂ /Água			[-]
(VERMA, TIWARI e CHAUHAN, 2017)	(Cu+Al ₂ O ₃)/Água	Dois passos	0,5-1,25	[-]
	Grafeno/Água			20
	MWCNT/Água			7
	SWCNT/Água			$L=(5-30)*10^3$ $D=(1-2)$
(CÁRDENAS, PAZ e BANDARRA FILHO, 2017)	Ag/água	Dois passos	0,1-0,5	20
(OLIVEIRA, CÁRDENAS CONTRERAS e BANDARRA FILHO, 2017)	MWCNT/EG	Dois passos	<0,15%	[-]
(CÁRDENAS CONTRERAS, OLIVEIRA e BANDARRA FILHO, 2019)	Grafeno/EG	Dois passos	<0,15%	[-]
	Ag/EG			40
Presente trabalho	Ag/óleo	Dois passos	<0,05%	20-80
	CNT/óleo			[-]
	Ag/(H ₂ O:EG)			80
	CNT/(H ₂ O:EG)			[-]
	DI/(H ₂ O:EG)			<5
	Al ₂ O ₃ /(H ₂ O:EG)			40

2.4. Propriedades termofísicas dos nanofluidos

Segundo o Prêmio Nobel de química o professor Richard E. Smalley, a eficiência energética está sendo considerada como o principal desafio dos dez maiores desafios da humanidade que tem que ser superados nos próximos 50 anos, já que a energia desempenha um papel importante para dar solução às outras preocupações globais. (SMALLEY, 2005) enfatizou que, as inovações em nanotecnologia e avanços na ciência de materiais possibilitariam transformar nossa visão de abundante disponibilidade energética e de baixo custo.

Nesse sentido, os nanofluidos podem ser considerados uma alternativa promissora de fluidos de transferência de calor que aumentem a eficiência energética dos processos, uma vez que, oferecem novas possibilidades para melhorar o desempenho da transferência de

calor em comparação com fluidos convencionais de arrefecimento. Segundo (HOFFMANN, 2014), os incrementos de transferência de calor, utilizando nanofluidos pode ser influenciado por fatores tais como: a gravidade, o movimento Browniano, as forças de atrito entre as nanopartículas e o fluido circundante, as nanocamadas na interfase sólido-líquido, o tamanho, forma, natureza e concentração de nanopartículas, as compatibilidades físico-químicas entre as nanopartículas e os fluidos base. Assim, existem diferentes correlações disponíveis na literatura para calcular as propriedades fundamentais dos nanofluidos para o desenvolvimento e a aplicação de novos sistemas. Contudo, a maioria dessas equações são relacionada ao efeito da concentração de volume, e em alguns casos estas equações foram estabelecidas muito antes do surgimento do conceito de nanofluido. No entanto, a caracterização dos nanofluidos é alvo de intensa pesquisa e os resultados produzidos no que se refere a trabalhos experimentais, numéricos e analíticos, apresentam inconsistências dificultando o consenso da comunidade científica.

Portanto, a massa específica, o calor específico, a condutividade térmica e a viscosidade, são as principais propriedades termofísicas necessárias para calcular o desempenho de um sistema térmico. Portanto, os modelos e correlações comumente utilizados para determinar estas propriedades são descritos a seguir.

2.4.1. Massa específica

A massa específica dos nanofluidos geralmente é determinada por intermédio do modelo matemático compatível com a regra da mistura. Inicialmente Pak e Cho, (1998), ao medirem a massa específica de amostras de nanofluido de dióxido de titânio e de alumina a base de água com concentração de nanopartículas de até 31,6%, encontraram um desvio máximo de 0,6% em relação aos resultados calculados pela teoria da regra da mistura.

Uma vez determinada a concentração em volume de nanopartículas na dispersão (ϕ), a massa específica das nanopartículas (ρ_{np}) fornecida pelos fabricantes e conhecendo a massa específica do componentes do fluido base (ρ_{fb}), finalmente a massa específica da dispersão (ρ_{nf}), pode ser calculada a partir da regra da mistura apresentada na Eq.(2.2).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \cdot \rho_{bf} + \phi \cdot \rho_{np} \quad (2.2)$$

Outros trabalho como o realizado por (VAJJHA, DAS e MAHAGAONKAR, 2009) realizaram medições de massa específica em três nanofluidos diferentes contendo nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de antimônio-estanho ($\text{Sb}_2\text{O}_5/\text{SnO}_2$) e óxido de zinco (ZnO) em um fluido base de como concentração em massa 60% etileno glicol

e 40% água. As medições de massa específica foram realizadas em uma faixa de temperatura de 0°C a 50°C para várias concentrações de volume de partículas de até 10%. Os resultados experimentais mostraram uma boa concordância com a equação teórica com desvios máximos de 1,18% para o nanofluido de (Al₂O₃), 1,14% para o nanofluido de (Sb₂O₅/SnO₂) e de -7,07% para o nanofluido de (ZnO). (KEDZIERSKI, 2013) reportou uma boa concordância dos resultados da medição de massa específica de misturas de nanopartículas de (Al₂O₃) e óleo lubrificante sintético com os resultados a partir de regra da mistura aplicada a nanolubrificantes de óleo sintético. Os desvios não foram superiores que $\pm 1\%$ da predição da massa específica aplicando a regra da mistura.

2.4.2. Calor específico

Para O'Hanley, *et al.* (2012), os nanofluidos estão sendo considerados em aplicações de transferência de calor. Assim, é importante conhecer as propriedades termofísicas com precisão. Seu trabalho focou sobre a medição e validação de dois modelos para calcular o calor específico de nanofluidos ($c_{p,nf}$) que dependem da concentração e tipo de material das nanopartículas. Os autores apresentaram dois modelos para calcular o calor específico dos nanofluidos. O primeiro modelo que considera a concentração volumétrica das nanopartículas (ϕ), o calor específico do fluido base ($c_{p,fb}$) e o calor específico da nanopartícula ($c_{p,np}$), similar à teoria da mistura que é aplicado para misturas de gás ideal e que para os nanofluidos é calculado por intermédio da Eq. 2.3.

$$c_{p,nf} = (1 - \phi) \cdot c_{p,fb} + \phi \cdot c_{p,np} \quad (2.3)$$

No entanto, a Eq. 2.3 é aproximadamente correta somente para dispersões onde a diferença existente entre a massa específica da nanopartícula e do fluido base é pequena Wang, *et al.* 2010. O segundo modelo, é baseado no pressuposto do equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante, que aplicando a primeira lei da termodinâmica origina-se o modelo matemático para o cálculo do calor específico do nanofluido ($c_{p,nf}$) dado pela Eq. 2.5.

$$V_{nf} (\rho c_p)_{nf} = \phi V_{nf} (\rho c_p)_{np} + (1 - \phi) V_{nf} (\rho c_p)_{fb} \quad (2.4)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_{fb} + \phi(\rho c_p)_{np}}{(1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}} \quad (2.5)$$

Embora o segundo modelo inicialmente aplicado por (XUAN e ROETZEL, 2000), trabalhe com a fração em volume, também considera a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão. Tanto Wang, *et al.* (2010), como O'Hanley, *et al.* (2012), concluíram

que os resultados obtidos experimentalmente do calor específico em nanofluidos de CuO/EG, CuO/água, SiO₂/água e Al₂O₃/água respectivamente, concordaram satisfatoriamente com o segundo modelo de predição para calor específico, baseado no equilíbrio térmico. Ainda assim, pesquisas como a realizada por Vajjha e Das (2009), para medir o calor específico para três nanofluidos, Al₂O₃/EG-água, SiO₂/EG-água e ZnO/EG-água, mostraram que os dois modelos existentes para determinar o calor específico em nanofluidos ($c_{p,nf}$) não apresentaram boa concordância com os valores obtidos experimentalmente. Consequentemente, foi desenvolvida uma correlação para calcular o calor específico em nanofluidos ($c_{p,nf}$) em função da concentração volumétrica das nanopartículas (ϕ), a temperatura, o calor específico do fluido base ($c_{p,fb}$) e o calor específico da nanopartícula ($c_{p,np}$). Portanto, a equação que melhor se ajustava aos dados experimentais de todos os nanofluidos produzidos foi a Eq. 2.6.

$$\frac{c_{p,nf}}{c_{p,fb}} = \frac{\left((A * T) + B * \left(\frac{c_{p,np}}{c_{p,fb}} \right) \right)}{(C - \phi)} \quad (2.6)$$

Onde A, B e C, são coeficientes de ajuste de curva para cada nanofluido produzido.

Recentemente, foi proposto por (CHADHA e SRIVASTAVA, 2017) um modelo matemático para determinar o calor específico dos nanofluidos considerando o efeito da nanocamada ou camada interfacial. Assume-se, portanto, que a nanopartícula e a partícula equivalente formada com uma camada interfacial em torno da nanopartícula são ambas esféricas com os respectivos raios de (r_{np}) e ($r_{np}+h$), onde a espessura da camada h é muito pequena em comparação com o raio da nanopartícula. (r_{np}), como está representado na Fig. 2.7.

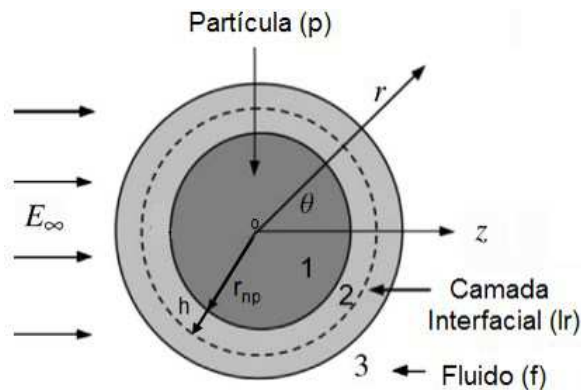


Figura 2.7 - Representação esquematizada de uma nanopartícula com camada interfacial num fluido circundante. Fonte: Adaptado de (MURSHED, LEONG e YANG, 2008)

Assim, o volume equivalente para a partícula equivalente é dado pela Eq. 2.7.

$$V_{eq} = V_{np} + V_{nc} \quad (2.7)$$

Onde, o volume da nanopartícula, (V_{np}) e o volume da camada interfacial (V_{nc}) são dados pelas equações Eq. 2.8 e Eq. 2.9.

$$V_{np} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_{np}^3}{3} \quad (2.8)$$

$$V_{nc} = 4 \cdot \pi \cdot r_{np}^3 \cdot \delta \quad (2.9)$$

Onde, δ , é a relação entre a espessura da camada interfacial e o raio da nanopartícula ($\delta = h/r_{np}$). Assim, a fração de volume equivalente da partícula pode ser descrita pela Eq. 2.10.

$$\phi_{eq} = \frac{V_{eq}}{V_{nf}} = \frac{V_{np} + V_{nc}}{V_{nf}} = \frac{V_{np}}{V_{nf}} + \frac{V_{nc}}{V_{nf}} \quad (2.10)$$

Onde (V_{nf}), é o volume total do nanofluido. Assim, a fração de volume de partículas equivalente pode ser reescrito pela Eq. 2.11 e a massa específica do nanofluido pode ser obtida intermédio da Eq. 2.12

$$\phi_{eq} = \phi_{np} + \phi_{nc} \quad (2.11)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_{eq}) \cdot \rho_{bf} + \phi_{np} \cdot \rho_{np} + \phi_{nc} \cdot \rho_{nc} \quad (2.12)$$

Portanto, o calor específico também é determinado sobre o pressuposto de que existe um equilíbrio térmico entre a partícula equivalente e o fluido base, como pode ser descrito na Eq. 2.13.

$$V_{nf} \cdot (\rho c_p)_{nf} = \phi_{np} \cdot V_{nf} \cdot (\rho c_p)_{np} + \phi_{nc} \cdot V_{nf} \cdot (\rho c_p)_{nc} + (1 - \phi_{eq}) \cdot V_{nf} \cdot (\rho c_p)_{fb} \quad (2.13)$$

Originando-se o modelo matemático para o cálculo do calor específico do nanofluido ($C_{p,nf}$) que introduz o efeito da camada interfacial que é dado pela Eq. 2.14.

$$(c_p)_{nf} = \frac{\varphi_{np} \cdot (\rho c_p)_{np} + \varphi_{nc} \cdot (\rho c_p)_{nc} + (1 - \varphi_{eq}) \cdot (\rho c_p)_{fb}}{(1 - \varphi_{eq}) \cdot \rho_{bf} + \varphi_{np} \cdot \rho_{np} + \varphi_{nc} \cdot \rho_{nc}} \quad (2.14)$$

Onde, o calor específico da camada interfacial ($C_{p_{nc}}$) é dado pela Eq. 2.15

$$C_{p_{nc}} = \frac{C_{p_{fb}} \cdot L^2}{(L - \delta) \cdot \ln(1 + L) + \delta \cdot L} \quad (2.15)$$

Sendo (L) determinado pela Eq. 2.16

$$L = \varepsilon_p \cdot (L + \delta) - 1 \quad (2.16)$$

Onde, δ , é a relação entra a espessura da camada interfacial e o raio da nanopartícula ($\delta = h/r_{np}$) e ε_p , é a relação entre o calor específico das nanopartículas e o calor específico do fluido base. ($\varepsilon_p = C_{p_{np}}/C_{p_{fb}}$). Portanto, pode ser inferido que o calor específico de um nanofluido obtido por intermédio da Eq. 2.14 é também uma função do calor específico das nanopartículas, do calor específico da nanocamada e do fluido base, e depende também de parâmetros geométricos como o tamanho das nanopartículas. Finalmente, (CHADHA e SRIVASTAVA, 2017) afirmaram que a camada interfacial tem um aporte significativo quando compara a contribuição da nanopartícula na da determinação do calor específico dos nanofluido. Portanto, a camada interfacial aumenta a fração volumétrica total das nanopartículas que, por sua vez, diminui o calor específico do nanofluido. Assim, quando compararam os resultados experimentais de nanofluidos de alumina (Al_2O_3) a base de água-etileno glicol com os resultados do modelo que considera o efeito da camada interfacial descrito na Eq. 2.15. encontraram uma melhor concordância que na comparação realizada com o modelo do equilíbrio térmico descrito na Eq. 2.5.

2.4.3. Condutividade Térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos (k_{nf}) é uma das propriedades que mais tem sido pesquisadas e da qual tem uma grande quantidade de trabalhos reportados na literatura com pode ser observado na fig. 2.4. Depois de Masuda, *et al.* (1993); Choi, *et al.* (2001); Eastman, *et al.* (2001); Xie, *et al.* (2003) e Murshed, *et al.* (2005) ter relatado incrementos na condutividade térmica efetiva em dispersões de diversos tipos nanopartículas em diferentes fluidos base (água, etileno glicol ou óleos), ainda e alvo de análise verificar se o aumento da condutividade é anômalo ou pode ser previsto da teoria do meio efetivo (EMT) de Maxwell (1873). Além disso, muitos relatos sobre a condutividade térmica de nanofluidos são

controversos, devido aos comportamentos complexos associados à relação química e a física entre nanopartículas e o fluido circundante.

No entanto, o elevado número de pesquisas dedicadas nesta área, possibilitou que fossem propostos modelos matemáticos para descrever alguns efeitos que podem ser a causa dos comportamentos anômalos presentes na condutividade térmica dos nanofluidos. Uma lista dos principais efeitos que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos foram coletados e relatados por Philip e Shima (2012) e (ARSHAD, JABBAL, *et al.*, 2019) são apresentados na Fig. 2.8 e são descritos na sequência:



Figura 2.8 - Fatores que afetam a condutividade térmica do nanofluido. Fonte: adaptado de (ARSHAD, JABBAL, *et al.*, 2019)

- Efeito do tamanho das nanopartículas: O tamanho da nanopartícula é um parâmetro físico significativo que afeta a condutividade térmica e a estabilidade dos nanofluidos. Os pesquisadores têm declarado que o tamanho da nanopartícula tem um papel significativo no aumento e diminuição da condutividade térmica do nanofluido. A maioria dos trabalhos apresenta um maior é o incremento da condutividade térmica dos nanofluidos na mesma

concentração volumétrica de nanopartículas, (ϕ), quando estas são de menor tamanho. (MUNYALO e ZHANG, 2018)

- Efeito da forma das nanopartículas: Geralmente duas formas de partículas, cilíndricas e esféricas, tem sido foco de estudo para demonstrar o efeito da forma das nanopartículas na condutividade térmica dos nanofluidos (AHMADI, MIRLOHI, *et al.*, 2018). O efeito da forma da partícula é geralmente associado com relação de aspecto; relação comprimento-diâmetro da nanopartícula. Experimentos mostraram que quanto maior a razão de aspecto (r) de nanopartículas cilíndricas ou com forma de bastonete, maior são os incrementos na condutividade térmica de nanofluidos quando comparado com nanopartículas de formato esférico, devido à maior área superficial pelo longo do comprimento da partícula (CÁRDENAS, PAZ e BANDARRA FILHO, 2017).
- Efeito da condutividade térmica e concentração de nanopartículas (ϕ): A grande maioria dos estudos realizados apresenta uma relação direta do incremento da condutividade do nanofluido com a condutividade das nanopartículas e com o incremento da concentração de materiais nanoparticulados. Este efeito é muito mais expressivo quando são utilizadas nanopartículas híbridas na produção de nanofluidos como descrito por (HUMINIC e HUMINIC, 2018).
- Efeito de aditivos: Manter a dispersão de nanopartículas estáveis nos fluidos base por longos períodos de tempo é um dos problemas que podem ser contornados com a aplicação de aditivos. O principal objetivo dos dispersantes é aumentar a estabilidade cinética, mantendo-se inalterável com o passar do tempo. Estudos tem revelado que os nanofluidos que apresentaram períodos mais longos de estabilidade, apresentaram incrementos significativos na condutividade térmica. (SHAH, RANJAN, *et al.*, 2019) afirmaram que a presença de aditivos (PVA) em nanofluidos de CuO/(EG:H₂O 40:60) contribuiu não somente com a estabilidade do nanofluido, também favoreceu o aumento na condutividade térmica dos nanofluidos.
- Efeito da acidez: Autores tem reportado que a aglomeração cinética de partículas pode ser controlada com o ajuste na acidez da dispersão. Por exemplo, Wang, *et al.* (2009) observaram que para nanofluidos de Cu e Al₂O₃ com água, a condutividade do nanofluido de todas as concentrações testadas aumentava, quando o pH diminuía, enquanto que para um pH mais alto a condutividade dos nanofluidos apresentava uma diminuição. Eles concluíram que um valor ótimo do pH poderia resultar em uma maior intensificação da condutividade dos nanofluidos.

- Efeito das aglomerações: As aglomerações de nanopartículas podem criar caminhos de menor resistência térmica, assim o calor pode ser transferido rapidamente dentro das aglomerações e com isso, aumentar significativamente a condutividade térmica dos nanofluidos, como descrito por (KEBLINSKI, PHILLPOT, *et al.*, 2002). No entanto, (OLIVEIRA, 2018) afirmou que as aglomerações de tamanhos maiores tendem a sedimentar com o passar do tempo, resultando em uma diminuição da concentração e também em finas camadas floculadas dispersas no fluido base, favorecendo à diminuição da condutividade térmica.
- Efeito da temperatura: A influência da temperatura na condutividade térmica do nanofluidos continua sendo discutida, alguns trabalhos mostraram intensificação da condutividade térmica com incrementos de temperatura. (LI, QU e FENG, 2008) analisaram o efeito significativo da temperatura no incremento da condutividade térmica. Os resultados da análise e do cálculo mostram que com temperaturas mais elevadas beneficia à redução da energia superficial da partícula, diminuindo a possibilidade aglomeração das nanopartículas e causando uma diminuição da viscosidade, que faz o com que o movimento browniano ou os movimentos estocásticos das partículas sejam intensificados.
- Efeito do movimento: De acordo com (ARSHAD, JABBAL, *et al.*, 2019). Existem três tipos de movimento que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos. O movimento por termoforese (devido ao gradiente de temperatura), o movimento browniano (força e colisões) e o movimento pelo transporte de massa (devido ao gradiente de concentração).
- Efeito da condutividade do fluido base: A maioria dos estudos têm mostrado uma diminuição no incremento da condutividade térmica do nanofluido quando são utilizados fluidos base com maior condutividade, um exemplo deste efeito foi relatado por Chen, *et al.* (2008) que estudaram a condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono (MWCNT) onde o fluido base utilizado foi água, etileno glicol e glicerol. Eles mostraram que a intensificação da condutividade térmica foi menor para nanofluidos a base de água, já que o incremento de k_{nf} para concentrações em volume de 1% de nanotubos de carbono foi de 17,5% baseados em etileno glicol, 16% para glicerol e 12% em água.

Correlações para prever a condutividade térmica de nanofluidos

Maxwell (1873), foi um dos primeiros pesquisadores a estudar analiticamente a condução de fluidos com partículas suspensas. Estudou o fenômeno da condução sobre um enfoque macroscópico de transporte de calor, considerando suspensões bem diluídas e

estáveis de partículas esféricas, para ignorar assim as iterações entre elas. A expressão foi obtida da solução de uma equação de Laplace para o campo de temperatura no meio líquido circundante das partículas. Além disso, considerou um volume esférico total que contém todas as partículas esféricas da suspensão com uma condutividade térmica parcial (k_p), dentro de uma base com condutividade térmica (k_m). O resultado foi a Eq. 2.17, que é apresentada em uma nomenclatura arranjada para nanofluidos.

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})} \quad (2.17)$$

É importante enfatizar que a Eq.(2.17) desenvolvida por Maxwell (2013), é unicamente uma primeira aproximação para determinar a condutividade térmica e pode ser aplicada somente para misturas com partículas esféricas e baixa concentração volumétrica (ϕ).

Após do trabalho de Maxwell (1873), um grande número de modificações e ajustes foram realizados a partir da Eq.(2.17), levando em consideração parâmetros tais como a forma da partícula, distribuição das partículas no fluido base, altas concentrações em volume de partículas, aspecto externo das partículas e resistência de contato. Estes modelos propostos ao longo do século XX podem ser chamados de modelos clássicos, cujas principais características são a Teoria do Meio Efetivo (EMT), considerações anisotrópicas para a condutividade térmica, distribuição das partículas, entre outras.

Modelo com efeito da forma da nanopartícula: Entre os modelos clássicos, o modelo que tem apresentado um aporte maior é o desenvolvido por Hamilton e Crosser (1962), já que contempla um parâmetro de avaliação da forma da partícula. O modelo apresentado pela Eq. 2.18 é atualmente aplicado para validação de resultados experimentais.

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\psi^{-1}\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})} \quad (2.18)$$

Onde (ψ) representa o parâmetro de esfericidade da partícula definida como uma razão entre a área superficial de uma esfera e a área superficial de uma partícula, possuindo o mesmo volume da partícula suspensa. Por exemplo para ($\psi = 1$) a partícula é esférica e a equação resultante da Eq.(2.18) seria igual ao modelo de Maxwell (1873) apresentado na Eq. (2.17). Estes modelos clássicos conseguem prever razoavelmente a condutividade térmica para misturas de partículas sólidas dispersas em fluidos base. No entanto, as comparações

entre dados experimentais para condutividade térmica dos nanofluidos com as previsões dos modelos clássicos geralmente não são satisfatórias.

Diversos autores como Keblinski, *et al.* (2002) e Yu, *et al.* (2007), também justificaram que o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos poderia estar associada a mecanismos tais como o movimento Browniano das nanopartículas, a camada interfacial entre a nanopartícula e o fluido base e as aglomerações de nanopartículas. Estes mecanismos, que foram identificados e formulados especificamente para escalas nanométricas, foram adicionados nas correlações clássicas para melhorar as previsões da condutividade térmica de nanofluidos.

Modelo com efeito do Movimento Browniano: O movimento Browniano pode ser definido como um movimento aleatório que desloca as nanopartículas imersas num fluido. Este poderia ser um fator potencial para o cálculo da intensificação da condutividade térmica, já que justificaria incrementos da condutividade térmica que não são previstos pelas correlações clássicas. Este fenômeno, originalmente observado em 1828 pelo botânico escocês Robert Brown e posteriormente tratado por Einstein em 1905, estuda o comportamento irregular das partículas em suspensão, que surge devido aos movimentos moleculares térmicos. O resultado final é uma das expressões mais conhecidas de Einstein, precursora dos teoremas de flutuação-dissipação, que relaciona a temperatura e a viscosidade do fluido com o coeficiente de difusão “D” Salinas, (2005), dado pela Eq. 2.19

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\mu d} \quad (2.19)$$

Onde ($k_B=1,381 \times 10^{-23}$) é a constante de Boltzmann, (μ) é a viscosidade do fluido e (d) é o diâmetro da partícula. Com a Eq.(2.19), pode ser estimado o efeitos do movimento Browniano sobre a condutividade térmica comparando na mesma constante de tempo (τ), o movimento das partículas com a difusão de calor no fluido circundante. Em outras palavras a Eq. 2.20 relaciona o tempo que tarda uma partícula em deslocar-se para uma distância igual ao diâmetro dela, (τ_D), e a Eq. 2.21 relaciona o tempo necessário para difundir o calor através do líquido na mesma distância, τ_H .

$$\tau_D = \frac{d^2}{6D} = \frac{3\pi\mu d^3}{6k_B T} \quad (2.20)$$

$$\tau_H = \frac{d^2}{6X} = \frac{d^2 c_p \rho}{6k_f} \quad (2.21)$$

Baseados neste conceito, Xuan, Li e Hu (2003) propuseram uma modificação do modelo de Maxwell (1873), apresentado na Eq. (2.22)

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})} + \frac{k_{fb} \rho_{np} c_{p,np} \phi}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi \mu_{fb} r_c}} \quad (2.22)$$

Pode ser observado na Eq. 2.22 que a condutividade térmica do nanofluido depende da viscosidade do fluido base, da condutividade térmica do fluido base e da condutividade térmica, massa específica, calor específico e concentração das nanopartículas. Também pode ser observado que o modelo inclui os efeitos da aglomeração por intermédio da variável (r_c) que é definida como o raio médio das aglomerações presentes na dispersão, mas esta variável precisa ser determinada experimentalmente.

Modelo com efeito da camada interfacial ou nanocamada: chamada assim por Yu, *et al.* (2000), são estruturas de camada formada por moléculas de líquido próximas da superfície das nanopartículas. Esta nanocamada possui uma condutividade térmica diferente (k_{nc}) que é menor que a condutividade térmica da nanopartícula (k_{np}) e maior que a condutividade do fluido base (k_{fb}). Portanto, quanto maior seja sua espessura e condutividade, maior será a intensificação da condutividade térmica do nanofluido. Yu e Choi (2003), consideraram a existência da nanocamada e modificaram o modelo de Maxwell (1873), onde incluíram o efeito da camada interfacial. O resultado do seu trabalho foi descrito pelo modelo descrito na Eq. 2.23:

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi_c \frac{k_c - k_{fb}}{2k_{fb} + k_c - \phi(k_c - k_{fb})} \quad (2.23)$$

Onde (k_c) é a condutividade térmica da camada interfacial que precisa ser previamente conhecida o que dificulta a aplicação do modelo. Uma representação esquemática da camada interfacial é mostrada na Fig. 2.9.

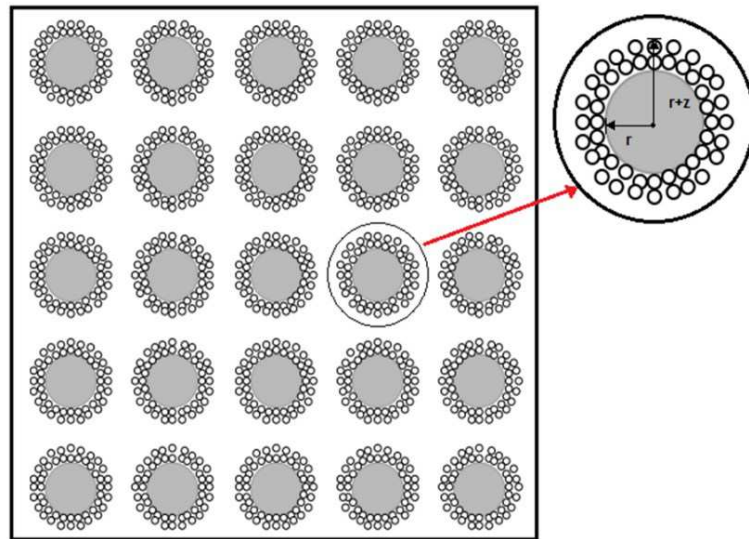


Figura 2.9 - Representação esquemática da camada interfacial em uma dispersão de nanopartículas. Yu e Choi (2003).

Modelo com efeito das aglomerações: As nanopartículas geralmente formam estruturas de aglomerados, a presença e quantidade de aglomerações influencia as propriedades físicas dos nanofluidos, estas estruturas de aglomerações agem como sistema locais de percolação o que beneficia a dissipação do calor da nanopartícula para o fluido base (ver Fig. 2.10), porém contribui para a intensificação da condutividade térmica do nanofluido. No entanto, uma presença elevada de aglomerados na dispersão, ocasionaria instabilidades e prejudicaria o desempenho térmico e comportamento fluidodinâmico do nanofluido.

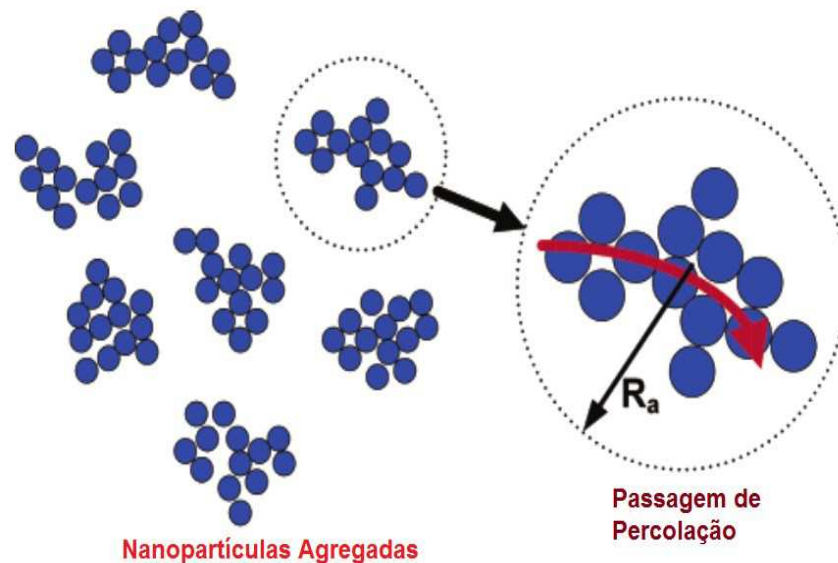


Figura 2.10 - Esquema de nanopartículas aglomeradas em uma dispersão onde (R_a) é o raio de giro do agregado. Prasher, *et al.* (2006).

Prasher, *et al.* (2006), observaram anomalias reportadas em trabalhos experimentais, onde a intensificação da condutividade térmica de nanofluidos poderias ser resultado da agregação de nanopartículas. O modelo proposto por eles incluem os efeitos dos agregados de nanopartículas e foi descrito pela Eq. 2.24, que também pode ser considerado com uma modificação do modelo de Maxwell (1873) apresentado na Eq. 2.17.

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3 \left(\frac{r_a}{r_{np}} \right)^{3-d_f} \phi_{np} \frac{k_a - k_{fb}}{2k_{fb} + k_a - \left(\frac{r_a}{r_{np}} \right)^{3-d_f} \phi(k_a - k_{fb})} \quad (2.24)$$

Onde (d_f) é a dimensão fractal, (r_a) é o raio de giro do agregado e (k_a) é a condutividade do agregado que pode ser estimada pela equação de Bruggeman (1935) descrita na sequência:

$$0 = \left[1 - \left(\frac{r_{np}}{r_a} \right)^{3-d_f} \right] \frac{k_{fb} - k_a}{2k_a - k_{fb}} + \left(\frac{r_{np}}{r_a} \right)^{3-d_f} \frac{k_{np} - k_a}{2k_a + k_{np}} \quad (2.25)$$

Finalmente, são mostrados na Tab. 2.5 os modelos existentes que apresentam maior destaque para prever a condutividade térmica dos nanofluidos.

Tabela 2.5 - Modelos para prever a condutividade térmica de nanofluidos

Autor	Expressão	Observações
Maxwell (1873)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})}$	Partículas esféricas são consideradas.
Hamilton e Crosser (1962)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\psi^{-1}\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})}$	Partículas não esféricas. (ψ) é o parâmetro de esfericidade.
Xuan, <i>et al.</i> (2003)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})} + \frac{k_{fb}\rho_{np}C_{p,np}\phi}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}r_c}}$	Considera efeitos do movimento Browniano das nanopartículas
Yu e Choi (2003)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi_c \frac{k_c - k_{fb}}{2k_{fb} + k_c - \phi(k_c - k_{fb})}$	Considera efeitos de estruturas de camada interfacial
Prasher, <i>et al.</i> (2006)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3 \left(\frac{r_a}{r_{np}} \right)^{3-d_f} \phi_{np} \frac{k_a - k_{fb}}{2k_{fb} + k_a - \left(\frac{r_a}{r_{np}} \right)^{3-d_f} \phi(k_a - k_{fb})}$	Considera efeitos das aglomerações das nanopartículas

Métodos experimentais de medição da condutividade térmica dos nanofluidos

A condutividade é um dos parâmetros mais importantes e também responsável pela intensificação da troca térmica nos processos de transferência de calor. Consequentemente muitos trabalhos foram e continuam sendo realizados sobre esta propriedade característica de cada material. Atualmente, tem-se desenvolvido uma ampla variedade de métodos de medição da condutividade para diversos tipos de matérias. No entanto, a implementação dessas técnicas para realizar a medição da condutividade térmica em nanofluidos ainda é alvo de intensa discussão.

Alguns métodos de medição mais representativos da medição da condutividade térmica em nanofluidos foram mencionadas no trabalho de Buongiorno, *et al.* (2009), onde foram comparados resultados experimentais de mais de 30 instituições de pesquisa do mundo todo para amostras iguais de nanofluidos. Paul, *et al.* (2010), apresentaram um trabalho crítico de revisão sobre as técnicas mais utilizadas na medição da condutividade térmica dos nanofluidos. Os métodos de medição geralmente empregados para realizar a medição são descritos na Fig. 2.11.

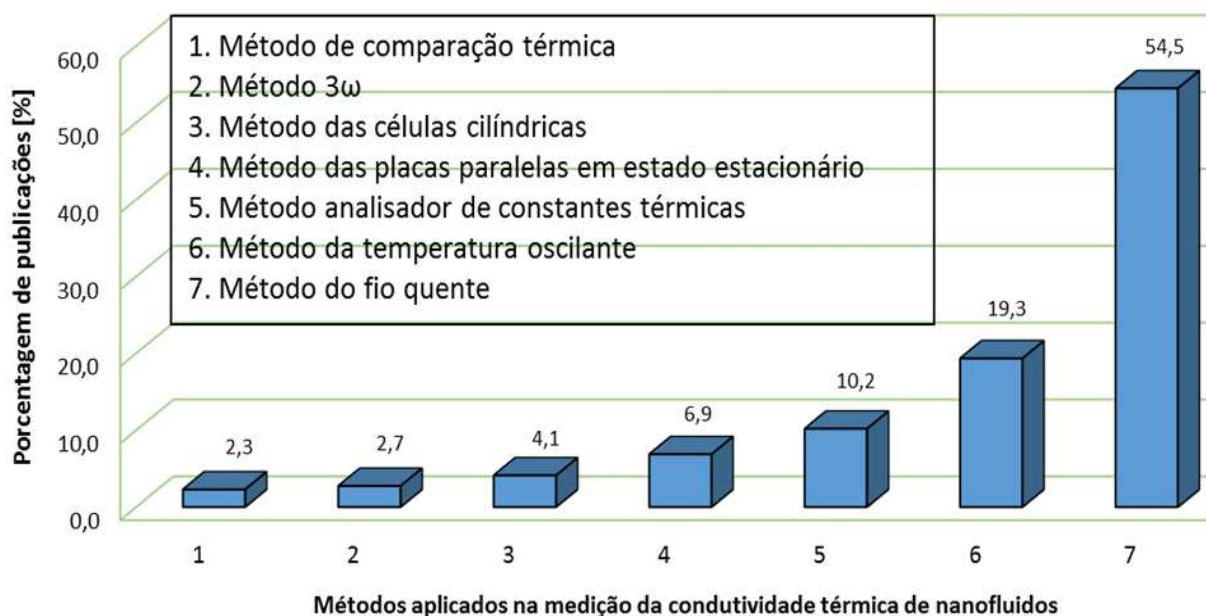


Figura 2.11 -Comparação dos métodos de medição da condutividade térmica dos nanofluidos. Fonte: Adaptado de Paul, *et al.* (2010) e atualizados com dados fornecidos pelo portal Elsevier.

A seguir são descritos brevemente alguns dos métodos para efetuar a medição da condutividade térmica dos nanofluidos.

Método do fio quente: O método do fio quente tem sido amplamente utilizado para medir a condutividade térmica dos nanofluidos. Ele realiza o cálculo desta propriedade por intermédio de um transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, sendo geralmente empregada para esta função uma sonda metálica linear longa e fina imersa em um fluido. Esta sonda possui em seu interior uma resistência de aquecimento que é conectada a uma fonte de energia externa a qual fornece uma tensão contínua, mantendo o fluxo de calor constante ao longo desta. Além da resistência, dispõe de um termopar que mede a temperatura no intervalo de tempo da realização do experimento. O modelo matemático apresentado na Eq. 2.26, precisa dos dados de temperatura registrados para medir a condutividade.

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4at}{r^2 C}\right) \quad (2.26)$$

Este modelo é uma derivação da equação de condução térmica, também conhecida como lei de Fourier, onde (k) e (α) são a condutividade e difusividade térmica do fluido testado e ($C=e^\gamma$), sendo ($\gamma=0,5772157$).

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 volumétricas de nanopartículas de 2,5% e 7,5% apresentaram incrementos na condutividade térmica de 24% e 78%, respectivamente.

Murshed, *et al.* (2005), mediram experimentalmente a condutividade térmica de nanopartículas de TiO₂ dispersas em água deionizada com uma concentração em volume de 5%, utilizando a técnica do fio quente. Os resultados mostraram que o nanofluido apresentou um incremento da condutividade térmica de 33% em comparação com o fluido base. Para evitar problemas associados à medição da condutividade em fluidos eletricamente condutores, a sonda é recoberta com uma camada fina de material isolante.

Método analisador de constantes térmicas: Este método utiliza a teoria da fonte plana transiente (TPS, do inglês Transient Plane Source) para calcular a condutividade térmica dos nanofluidos. O elemento TPS utilizado comporta-se como um sensor de temperatura e como fonte de calor, a medição da condutividade pelo TPS é baseada no método do fio quente. O

método apresenta vantagens como uma ampla faixa de medição na ordem de (0,02-200 W/mK), flexibilidade no volume da amostra e rápida resposta na medida.

Zhu, *et al.* (2009), com nanofluidos sintetizados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Água}$ realizaram a medição da condutividade aplicando o método analisador nas constantes térmicas. Eles observaram incrementos de condutividade térmica de 10,1% num nanofluido cuja concentração mássica de nanopartículas foi de 0,15%.

No mesmo ano e aplicando o mesmo método de medição Jiang, *et al.* (2009) mediram a condutividade térmica em nanorefrigerantes de nanotubos de carbono CNT/R113. Seus resultados mostraram que o nanorefrigerante incrementou a condutividade térmica comparada com o fluido base (R113) em até 104% para uma concentração de em volume de nanopartículas de 1%.

Método do cilindro coaxial em regime permanente: Na configuração do método, o cilindro interno é aquecido por uma banda térmica e no cilindro externo são colocados termopares para registra a temperatura de parede. Neste método, é registrada a diferença de temperatura entre as paredes do cilindro em regime permanente, quando o fluxo de calor passa através do fluido. A condutividade térmica é calculada aplicando o modelo de Ziebland (1969) descrito pela Eq. 2.27.

$$k = C_g \frac{Q_1 - Q_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (2.27)$$

Sendo (C_g) um coeficiente geométrico, (Q_1 , Q_2) o fluxo de calor e (ΔT_1 , ΔT_2) são as correspondentes diferenças de temperaturas.

Glory, *et al.* (2008), aplicando este método, realizaram as medições da condutividade térmica para uma faixa de temperatura de 15°C a 75°C em nanofluidos de MWCNT/água. Suas medições mostraram incrementos na condutividade térmica de 64% para uma concentração em massa de nanopartículas de 3%.

2.4.4. Viscosidade

Quando um fluido sofre uma tensão de cisalhamento, ele começa a mover-se com uma taxa de deformação inversamente proporcional a uma propriedade chamada de viscosidade (μ). Estas tensões de cisalhamento originam-se das forças de atração e colisões entre moléculas relativamente próximas. A viscosidade é uma importante propriedade no escoamento dos nanofluidos, devido que parâmetros como a queda de pressão, potência de

bombeamento, tipo de escoamento e transferência de calor por convecção dependem diretamente desta propriedade.

Embora na maioria dos trabalhos inicialmente publicados sobre o desempenho térmico-hidráulico dos nanofluidos foi considerado o comportamento reológico, os incrementos da viscosidade eram principalmente atribuídos aos efeitos da concentração volumétrica, no entanto, trabalhos como o desenvolvido por Mahbubul, *et al.* (2012), apresentam uma boa descrição de como a temperatura do fluido, o tamanho e a forma das nanopartículas, além da concentração de volume influenciam diretamente a viscosidade de um nanofluido. Por exemplo, Nguyen, *et al.* (2007) e Nguyen, *et al.* (2008), estudaram os efeitos da temperatura na viscosidade de nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Água}$ e $\text{CuO}/\text{Água}$ em uma faixa de temperatura de 21°C a 75°C , eles reportaram que os incrementos da viscosidade das amostras testada diminuiu com o incremento da temperatura.

Em outro estudo baseado no efeito da temperatura na viscosidade dos nanofluidos Duangthongsuk e Wongwises (2009), encontraram que para nanofluidos de $\text{TiO}_2/\text{Água}$, onde a medição de viscosidade foi realizada para uma faixa de temperatura de 15°C a 50°C , esta propriedade diminuía quando aumentava a temperatura.

Anoop, *et al.* (2009), estudaram a viscosidade de nanofluidos de CuO/EG , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$ para uma faixa de temperatura de 20°C a 50°C , onde a concentração em volume de nanopartículas variou de 0,5%, 1%, 2%, 4% e 6%. Seus resultados apresentaram incrementos da viscosidade em função da concentração em volume, apresentando decrementos em função do incremento da temperatura. Eles mostraram também que para concentrações em volume iguais de nanopartículas de Al_2O_3 dispersas em água, onde o tamanho da nanopartícula mudou de 45 nm a 150 nm de uma amostra para outra, a viscosidade apresentou um incremento para nanopartículas de 45nm.

Outras pesquisas realizadas por Chevalier, *et al.* (2007) e Namburu, *et al.* (2007), que mediram a viscosidade de nanofluidos de $\text{SiO}_2/\text{Etanol}$ e SiO_2/EG respectivamente, onde os diâmetros da nanopartículas eram diferentes em cada concentração, também afirmaram que o resultado da viscosidade incrementou com a redução do diâmetro das nanopartículas. Eles concluíram que a viscosidade dos nanofluidos também é dependente do tamanho e da forma da nanopartícula.

Timofeeva, *et al.* (2009), reportou que existe uma forte dependência da viscosidade dos nanofluidos com a forma e o tamanho das nanopartículas. Eles concluíram que para a mesma concentração volumétrica, nanofluidos contendo nanotubos ou nanoplaquetas apresentam incrementos maiores de viscosidade em comparação com nanopartículas esféricas. Já para

nanopartículas do mesmo tipo (nanotubos ou plaquetas) maiores razões de aspecto (relação comprimento-diâmetro da nanopartícula), resultavam em uma maior intensificação da viscosidade do nanofluido.

(KOLE e DEY, 2011), analisaram o efeito da concentração volumétrica de nanopartículas (0.005%-0.025%) e da temperatura (10-80°C) em nanofluidos de CuO/óleo de engrenagens. Os resultados mostraram que a viscosidade dos nanofluidos com concentração volumétrica de 0.025% aumentaram aproximadamente três vezes comparado ao fluido base. Eles observaram que a viscosidade do nanofluido diminui rapidamente com o aumento da temperatura. Eles afirmaram que para temperaturas mais elevadas os nanofluidos apresentam um enfraquecimento das forças de adesão entre partículas e fluido-partícula, possibilitando assim uma diminuição dos incrementos relativos da viscosidade em função da temperatura.

(SAEEDINIA, AKHAVAN-BEHABADI e RAZI, 2012), determinaram experimentalmente a viscosidade de nanofluidos estáveis e CuO/óleo mineral. As medições foram realizadas para nanofluidos com diferentes concentrações mássicas de nanopartículas (0.2-2%) e diferentes temperaturas. Os resultados experimentais evidenciaram que a viscosidade dinâmica cresce significativamente com o aumento da concentração de nanopartículas. Os maiores incrementos observados foram referentes às medições realizadas nas menores temperaturas.

(BEHESHTI, SHANBEDI e HERIS, 2014), investigaram a viscosidade dinâmica de nanofluidos MWCNT/óleo de transformador com concentrações mássicas de 0.001% e 0.01% em uma faixa de temperatura de 20 °C a 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, observaram que a viscosidade dos nanofluidos foi menor à do fluido base em média 2,6% e 1,4% respectivamente. (ASADI e ASADI, 2016), avaliaram experimentalmente a viscosidade dinâmica dos nanofluidos híbridos (MWNCT-ZnO) utilizando com fluido base óleo de motor. Os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas (15-55°C) e concentrações em volume de nanopartículas (0,125% a 1%). Os resultados mostraram a viscosidade dinâmica aumentou com o incremento da concentração em volume. O máximo incremento visualizado da viscosidade foi de 45% para a maior concentração em volume de nanopartículas na temperatura de 55°C.

(ILYAS, PENDYALA e NARAHARI, 2017), analisaram a viscosidade dinâmica de MWCNT/óleo térmico com concentrações em massa de nanopartícula de 0,1 a 1%. Todas as amostras testadas apresentaram incrementos da viscosidade quando comparada ao fluido base. Eles atribuíram os incrementos da viscosidade ao emaranhamento da estrutura dos

nanotubos e à elevada área específica dos nanotubos que aumenta a tensão superficial das nanopartículas. (ASADI, ASADI, *et al.*, 2018(a)) e (ASADI, ASADI, *et al.*, 2018(b)) determinaram experimentalmente a viscosidade dinâmica de dois tipos de nanofluidos híbridos, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MWCNT}$ /(óleo térmico) e $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MWCNT}$ /(óleo de motor), com concentrações em massa de nanopartículas de (0,125-1,5%) e (0,25-2%) respectivamente. Em ambos os tipos de nanofluidos foi observado que a tensão de cisalhamento aumentou linearmente com o aumento da taxa de cisalhamento, descrevendo o comportamento de fluidos Newtonianos. A viscosidade dinâmica relativa dos dois tipos de nanofluidos aumentou com o incremento da concentração de nanopartícula e a temperatura.

Recentemente, a viscosidade dinâmica de nanofluidos a base de óleo de polialfaolefina (PAO) foi determinada experimentalmente por (GUIMAREY, COMUÑAS, *et al.*, 2019). Eles produziram nanofluidos com três tipos de nanopartículas, óxido de zircônio (ZnO_2), nitreto de boro (NB) e nanoplaquetas de grafeno (GnP). Os resultados mostraram que todas as amostras de nanofluidos produzidas apresentaram um aumento da viscosidade relativa com a adição de nanopartículas.

A viscosidade dos nanofluidos é uma das propriedades que tem sido cuidadosamente estudada e diversos modelos tem sido propostos para a previsão da viscosidade de fluidos com nanopartículas suspensas. A maioria destes modelos é baseada na teoria de Einstein, (1906), fundamentada na hipótese de suspensões de partículas esféricas completamente diluídas sem interação entre elas, que sob cisalhamento com o fluido circundante, levam ao movimento rotacional das partículas dando origem à chamada "vorticidade" que aumenta a viscosidade da dispersão.

Alguns dos modelos utilizados para a predição da viscosidade em dispersões sólido-líquido foram recentemente apresentados nos trabalhos de (DEVENDIRAN e AMIRTHAM, 2016) e (YANG, XU, *et al.*, 2017) e são descritos na Tab. 2.6. Em geral, pode ser observado, que uma deficiência destes modelos é não considerar a forma e natureza das nanopartículas no cálculo da viscosidade dos nanofluidos. Porém os modelos levam em consideração somente a concentração volumétrica de nanopartículas (ϕ) e a viscosidade do fluido base (μ_{fb}). Não obstante, a viscosidade do fluido base é fortemente dependente da temperatura.

Tabela 2.6 - Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade dos nanofluidos

Autor	Modelo
Einstein (1906)	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_{fb}$
Bruijn (1942)	$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{1 - 2,5\phi + 1,552\phi^2} \right) \mu_{fb}$
Vand (1948)	$\mu_{nf} = (1 - 2,5\phi + 7,349\phi^2)\mu_{fb}$
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \right) \mu_{fb}$
Batchelor (1977)	$\mu_{nf} = (1 - 2,5\phi + 6,2\phi^2)\mu_{fb}$
Wang, <i>et al.</i> (1999)	$\mu_{nf} = (1 - 7,3\phi + 123\phi^2)\mu_{fb}$
Maïga, <i>et al.</i> (2004)	$\mu_{nf} = (1 - 0,19\phi + 306\phi^2)\mu_{fb}$
Nguyen, <i>et al.</i> (2008)	$\mu_{nf} = (1 - 0,025\phi + 0,015\phi^2)\mu_{fb}$

Fonte: Adaptada de (DEVENDIRAN e AMIRTHAM, 2016) e (YANG, XU, *et al.*, 2017).

2.5. Transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos

Segundo Choi (1995), os nanofluidos podem oferecer dispersões estáveis por longos períodos de tempo, incrementam pouco a perda de carga e apresentam uma maior condutividade térmica, o que favorece consideravelmente a transferência de calor por convecção. Para Pak e Cho (1998) e Xuan e Li (2003) a transferência de calor por convecção utilizando nanofluidos varia com as propriedades e dimensões das partículas, assim como a fração volumétrica. Devido às possíveis vantagens do uso dos nanofluidos, muitos pesquisadores têm estudado o desempenho da transferência de calor e características do escoamento de vários nanofluidos, com nanopartículas produzidas de diferentes materiais e vários fluidos base. Por exemplo, Wen e Ding (2004), usaram nanopartículas de Al_2O_3 dispersas em água com concentrações volumétricas de 0,6%, 1% e 1,6%, sob condições de escoamento de regime laminar. Conseguiram acréscimos até 47% no coeficiente local de transferência de calor por convecção em comparação com o fluido base.

Heris, *et al.* (2006), mostraram resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor de nanofluidos de $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$, os experimentos foram realizados para escoamento em regime laminar sob a condição de temperatura de parede constante. A base de comparação que utilizaram foi o número de Peclet, portanto a razão de incrementos para o número de Peclet de 5000, os nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$ com concentrações de 0.2% a 2.5% foi de 1.05 a 1.29 e para nanofluidos de $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ de 1.06 a 1.23.

Ding, *et al.* (2006), mostraram em sua pesquisa que para nanofluidos MWCNT/Água, que continham uma concentração em massa de 0,5% nanopartículas nanotubos de carbono (CNT), atingiram uma intensificação máxima do coeficiente de transferência de calor local de 350% em escoamento laminar para $\text{Re}=800$. Eles concluíram que a intensificação não pode ser somente atribuída ao aumento da condutividade térmica do nanofluido. Fatores como a concentração de nanopartícula, razão de aspecto, acidez e características de escoamento também influenciariam a intensificação da transferência de calor por convecção.

Garg, *et al.* (2009), testaram MWCNT/Água como concentração de massa de nanopartículas de 1%. Descrevem o método de sintetização do nanofluidos, assim com a caracterização das propriedades termofísicas, onde a condutividade apresentou um incremento de 20% em comparação com o fluido base e houve uma intensificação de 32% na transferência de calor por convecção para um número de Reynolds de 600.

Duangthongsuk e Wongwises, (2010), apresentaram experimentalmente o coeficiente de calor por convecção e o fator de atrito para uma dispersão de nanopartículas de TiO_2 em água, escoando num trocador de calor de tubo duplo em condições de regime turbulento. Os resultados mostraram que o nanofluido apresentou um aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção de 26% para uma concentração volumétrica de 1,0% comparado com o fluido base. No entanto, também mostraram que para a maior concentração testada, de 2,0vol% obtiveram um decréscimo aproximadamente de 14% comparado com água.

Amrollahi, *et al.* (2010), realizaram experimentos na região de entrada do escoamento onde ocorre o desenvolvimento da camada limite térmica e hidrodinâmica utilizando nanofluidos funcionalizados de MWCNT/Água cuja concentração mássica de nanopartículas utilizada foi 0,25%. Seus resultados mostraram que para escoamento em regime laminar, o coeficiente de transferência de calor por convecção aumentou de 33% a 40% em comparação com o fluido base. Já para regime turbulento os incrementos obtidos foram de 5% a 25%. O critério de comparação utilizado foi o mesmo número de Reynolds.

Vajjha, *et al.* (2010), pesquisaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de três nanofluidos: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{EG-água}$ (60:40); $\text{CuO}/\text{EG-água}$ (60:40) e $\text{SiO}_2/\text{EG-água}$ (60:40), escoando num tubo horizontal circular em regime turbulento. Eles mostraram que o coeficiente de transferência de calor para um número de Reynolds de 10000 aumentou em 29% para SiO_2 , 40% para Al_2O_3 e 43% para CuO , comparados ao fluido base. Todas as correlações experimentais para determinar as propriedades termofísicas dos nanofluidos foram desenvolvidas através de experimentos. Liu e Liao, (2010), testaram nanofluidos de MWCNT onde o fluido base era uma solução de água deionizada e cloreto de amônia para diminuir o arrasto e intensificar a troca térmica. Eles mostraram que para nanofluidos com concentração em massa de 1%, operando a 50°C, o coeficiente de transferência de calor aumentou 40% em comparação com o fluido base nas mesmas condições de número de Reynolds.

Asirvatham, *et al.* (2011), analisaram a transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos. Eles realizaram experimentos usando nanofluidos de $\text{Ag}/\text{água}$ 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 de 0,3%, 0,6% e 0,9%. Seus experimentos mostraram 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 $\phi=0,9\%$.

Sajadi e Kazemi (2011), analisaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluido de dióxido de titânio/água em escoamento plenamente desenvolvido em regime turbulento em um tubo horizontal, onde a fração de volume utilizada de nanopartículas no fluido base foi até 0,25%. Eles mostraram que para baixas concentrações em volume de nanopartículas de TiO_2 , o coeficiente de transferência de calor, para um número de Reynolds de 5000 e concentração de $\phi=0,25\%$, o acréscimo do coeficiente de transferência de calor foi de 22% em comparação com a água.

Sundar, *et al.* (2012), usando suspensões coloidais estáveis de nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 , com diâmetro médio de 36 nm, analisaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor e o fator de atrito do nanofluido num tubo circular, a faixa de escoamento avaliada foi de $3000 < \text{Re} < 22000$, com concentrações em volume inferiores de 0,6%. Seus estudos encontraram que o nanofluido com uma concentração em volume de 0,6% teve um incremento de 30,96% no coeficiente de transferência de calor e um acréscimo de 10,01% do fator de atrito, comparado com a água.

Kumaresan, *et al.* (2013), mostraram uma intensificação de 150% e 92% do coeficiente local de transferência de calor em $x/D_i = 93,46$ para nanofluidos de MWCNT/H₂O-EG (70:30) cujas concentrações volumétricas de nanopartículas foram 0,45% e 0,15%. Uma possível explicação, segundo os autores, 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.

Sundar, *et al.* (2014), analisaram experimentalmente o desempenho da transferência de calor por convecção em escoamento turbulento plenamente desenvolvido no interior de um tubo horizontal, uniforme, e constantemente, aquecido para nanofluidos híbridos de MWCNT-Fe₃O₄/água. Seus resultados indicaram incrementos do número de Nusselt de 31,1% e uma penalidade na potência de bombeamento de 18% para Re igual a 22000 e concentração em volume de nanopartículas de 0,3%.

Sadeghinezhad, *et al.* (2015), avaliaram experimental e numericamente o desempenho da transferência de calor de nanofluidos de Grafeno/água em regime turbulento, em um tubo horizontal de aço inoxidável, que foi submetido a um fluxo de calor uniforme na sua superfície externa. Para todos os casos estudados por eles foram observados bons incrementos do número de Nusselt em função do número de Reynolds. Por exemplo o número de Nusselt incrementou 75%, 79% e 83% para fluxos de calor de 8231, 10351 e 12320 W/m² respectivamente para concentrações de 0.1% em massa de nanopartículas.

Hamid, *et al.*, (2016), estudaram experimentalmente o desempenho da transferência de calor de nanofluidos de TiO₂/EG-água escoando em regime turbulento ($3000 < Re < 24000$) sob a condição de fluxo de calor constante. A concentração em volume de nanopartícula variou de 0.5% a 1.5%, e o desempenho de transferência de calor, assim com análise do fator de atrito foi avaliada em três níveis de temperatura, 30, 50 e 70 °C. Os experimentos mostraram um incremento máximo 1,32 a 1,37 vezes no coeficiente de transferência de calor para o nanofluidos em concentrações compreendidas entre $1.4\% < \phi < 1.5\%$ e regime de escoamento entre $4000 < Re < 6500$. No mesmo ano, Zanjani, *et al.*, (2016), analisaram o coeficiente de transferência de calor de nanofluidos de grafeno/água com baixas concentrações de nanopartícula, escoando em regime laminar. Os resultados experimentais mostraram que o máximo incremento observado para o coeficiente de transferência de calor foi de 14% com uma concentração em volume de 0.02% de nanopartícula.

Hekmatipour, *et al.*, (2016), analisara a transferência de calor por convecção em nanofluidos de CuO a base de óleo térmico em regime laminar ($110 < Re < 730$). Eles mostraram que a transferência de calor incrementa significativamente com o aumento da concentração de nanopartículas. Os incrementos observados foram na ordem de 22% para uma

concentração mássica de nanopartícula de 1,5%. Jafarimoghaddam, *et al.*, (2017) Estudaram experimentalmente, a transferência de calor por convecção de nanofluidos de Cu a base de óleo em regime laminar. Eles também observaram uma forte dependência da concentração de nanopartículas no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds (<140). Eles obtiveram incrementos no coeficiente de transferência de calor de 7,33%, 13,7% e 17,32% para concentrações em volume de nanopartículas de 0,011%, 0,044%, e 0,171% respectivamente.

Phanindra, *et al.*, (2018), avaliaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluidos híbridos de Al_2O_3 -Cu a base de óleo de transformador em regime laminar. Eles observaram incrementos no número de Nusselt de 12,06% acima do fluido base para escoamento em regime laminar ($\text{Re}=1820$).

Ainda que todos os estudos anteriormente relatados mostrem que houve aumento da transferência de calor por convecção forçada utilizando nanofluidos escoando em regime laminar e turbulento, outras pesquisas mostram inconsistências nos resultados apresentados. Pak e Cho (1998), observaram que em duas dispersões de partículas ultrafinas de óxidos metálicos Al_2O_3 e TiO_2 em água com concentrações em volume inferiores de 10%, o número de Nusselt em escoamento plenamente desenvolvido em regime turbulento aumentou proporcionalmente à concentração volumétrica e o número de Reynolds, no entanto, eles encontraram que para uma dispersão com 3% de concentração em volume, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi 12% menor.

Lee e Mudawar (2007), realizaram experimentos em microcanais, usando nanofluidos com baixas concentrações de Al_2O_3 dispersas em água, para observar o desempenho como fluido de arrefecimento. Eles mostraram que apesar do aumento da condutividade térmica que resulta na capacidade de aumentar o coeficiente de transferência de calor comparado com a água para o mesmo número de Reynolds, a eficácia como fluido de arrefecimento é quase irrelevante.

(WILLIAMS, BUONGIORNO e HU, 2008) avaliaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluidos de Al_2O_3 /água e ZrO_2 /água com concentrações em volume de nanopartícula de (0,9-3,6%) e (0,2-0,9%) respectivamente, escoando em regime turbulento ($9000 < \text{Re} < 63000$) em tubos horizontais lisos. Os resultados não mostraram nenhum aumento significativo da transferência de calor utilizando as amostras de nanofluidos.

Yu, *et al.* (2009), realizaram experimentos com nanofluidos, usando nanopartículas de carboneto de silício (SiC) dispersas em água como fluido base, com concentração em volume de 3,5%. O coeficiente de transferência de calor do nanofluido foi avaliado numa faixa de

número de Reynolds de 3000 a 13000. Seus estudos mostraram que o nanofluido comparado com a água para as mesmas condições de número de Reynolds teve acréscimos compreendidos entre 50% e 60%. Para o critério de velocidade constante o coeficiente de transferência de calor do nanofluido foi 7% menor e para o critério de comparação de potência de bombeamento constante, o coeficiente de transferência de calor do nanofluido apresentou uma diminuição de 20%.

Recentemente Meyer, *et al.* (2013), avaliaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor por convecção na condição superficial de fluxo de calor constante para nanofluidos MWCNT/Água escoando em um tubo horizontal em uma faixa de número de Reynolds de $1000 < Re < 8000$, incluindo a região de transição. Eles mostraram que para as três amostras testadas, cujas concentrações em volume foram 0,33%, 0,75% e 1% respectivamente, o coeficiente de transferência de calor do nanofluido apresentou um incremento em comparação com o fluido base para o mesmo número de Reynolds, mas quando as amostras foram comparados em função da velocidade do escoamento o coeficiente não apresentou incremento algum.

Haghighi, *et al.* (2014), também encontraram resultados contraditórios na avaliação experimental do coeficiente de transferência de calor em três tipos de nanofluidos diferentes (TiO_2 /água Al_2O_3 /água ZrO_2 /água) todos com concentração em massa de nanopartícula de 9%. Eles mostraram que quando o coeficiente de transferência de calor é comparado em função do número de Reynolds, o coeficiente de transferência apresenta incrementos de 8 a 51%, mas quando e comparado sob a mesma potência de bombeamento os decrementos para o coeficiente de transferência de calor som na ordem de 17 a 63% e portanto sugere que os resultados da transferência de calor devem ser comparados na mesma potência de bombeamento.

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 de 0.055% de MWCNT. Os resultados mostraram pequenos incrementos na transferência de calor para um mesmo número de Reynolds, porem o coeficiente de transferência de calor apresentou um decremento quando foi comparado sob a mesma velocidade.

No entanto, Nazari, *et al.* (2014), estudaram experimentalmente o desempenho térmico de nanofluidos de Al_2O_3 /água e CNT/água escoando dentro de um microtrocador. Os resultados mostraram um incremento do coeficiente de transferência de calor de 6% utilizando nanofluidos de Al_2O_3 /água com concentração em volume de nanopartícula de 0.5% sob a mesma velocidade de escoamento. No entanto o máximo incremento do coeficiente de

transferência de calor apresentado foi de 13%, obtido com nanofluidos de CNT/água cuja concentração em volume de nanopartícula foi de 0.25%.

Cárdenas Gómez, *et al.*, (2015), determinaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga envolvida no escoamento na região turbulenta de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla facilmente dispersíveis a base de água. A vazão mássica variou de aproximadamente 20 até 100g/s, o fluxo de calor foi mantido constantemente em 10, 14 e 18 [kW/m²], respectivamente, e as temperaturas de entrada foram controladas em 10°C, 15°C 20°C. O critério de comparação utilizada para avaliar o desempenho da transferência de calor por convecção foi o número de Reynolds (Re) e a velocidade mássica (G). Ele mostrou que para as três amostras testadas NT01 ($\phi=0,12\%$ e $r=600$), NT02 ($\phi=0,24\%$ e $r=100$) e NT03 ($\phi=0,24\%$ e $r=2400$) o coeficiente de transferência de calor aumentou 12,5%, 27% e 30% respectivamente comparado com o fluido base sobre o mesmo número de Reynolds (Re). No entanto, quando foi comparada a intensificação da transferência de calor por convecção com o mesma velocidade mássica (G) esta foi de -1% para NT01, -2% para NT02 e +6% para NT03.

Experimentos realizados por Shahrul, *et al.*, (2016) sobre a desempenho térmico de nanofluidos de ZnO/água-(PVP), Al₂O₃/água e SiO₂/água, mostraram que o coeficiente de transferência de calor dos três nanofluidos apresentaram incrementos máximos de 50%, 15% e 9% respectivamente em comparação com o fluido base sob as mesma vazão volumétrica.

Cárdenas Gómez, *et al.*, (2017), apresentaram resultados experimentais sobre o desempenho da transferência de calor por convecção de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT/água) e de prata (Ag/água), em escoamento em regime turbulento no interior de um tubo horizontal sob a condição de contorno de fluxo de calor constante na superfície externa do tubo. Os nanofluidos de maior concentração de nanopartículas apresentaram incrementos máximos de 10% e 34% no coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos (Ag/água) e (SWCNT/água) respectivamente para o mesmo número de Reynolds. No entanto, o coeficiente de transferência de calor em função da velocidade mássica apresentou um incremento máximo de 5,5% nas amostras de Ag/água e teve uma diminuição 13,5% nas amostras de SWCNT/água. Um resumo detalhado é apresentado na Tab. 2.7 com todas as pesquisas e análises da transferência de calor por convecção dos nanofluidos anteriormente descritos.

Tabela 2.7 - Trabalhos experimentais sobre a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Autor	Regime	Nanofluido	Incremento do h (%)
Pak e Cho (1998)	Turbulento	Al ₂ O ₃ /água	+45% no Nu, mesmo Re
Wen e Ding (2004)	Laminar	Al ₂ O ₃ /água	+ 47% do h _{Local} , mesmo Re
Ding, <i>et al.</i> (2006)	Laminar	MWCNT/água	+350% do h _{Local} , mesmo Re
Williams, <i>et al.</i> (2008)	Turbulento	Al ₂ O ₃ /água ZrO ₂ /água	Nenhum aumento representativo no Nu, mesma velocidade
Yu, <i>et al.</i> (2009)	Turbulento	SiC/água	-7% do h, $\phi=3,5\%$, mesma velocidade
Garg, <i>et al.</i> (2009)	Laminar	MWCNT/água	+32% do h, $\phi_{wt}=1\%$, mesmo Re
Vajjha, <i>et al.</i> (2010)	Turbulento	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CuO em [água-EG; (60:40)]	+29, +40 e +43% do h respectivamente, para mesmo Re.
Amrollahi, <i>et al.</i> (2010)	Laminar e Turbulento	MWCNT/água funcionalizados	+33% a 40% do h, para mesmo Re +5% a 25% do h, para mesmo Re
Duangthongsuk e Wongwises (2010)	Turbulento	TiO ₂ /água	+26% do h; $\phi=1\%$; mesmo Re -14% do h; $\phi=2\%$; mesmo Re
Liu e Liao (2010)	Turbulento	MWCNT/ (água+ CTAC)	+40% do h, $\phi_{wt}=1\%$, mesmo Re
Asirvatham, <i>et al.</i> (2011)	Laminar, Transição e Turbulento	Ag/água	+28,9 do h; mesmo Re -- +69,3 do h; mesmo Re
Sajadi e Kazemi (2011)	Turbulento	TiO ₂ /água	+22 do h; mesmo Re
Yang et al. (2011)	Laminar	DI-GP/óleo de silicone	+3 a 6% do Nu; mesmo Re
Baby e Sundara (2011(b))	Laminar Turbulento	GP-Ag/EG GP-Ag/água	+188% h _{Local} , $\phi=0,005\%$; mesmo Re +105% h _{Local} , $\phi=0,005\%$; mesmo Re
Sundar, <i>et al.</i> (2012)	Turbulento	Fe ₃ O ₄ /água	+30,96 do h; mesmo Re
Kumaresan, <i>et al.</i> (2013)	Laminar	MWCNT/ [água-EG; (70:30)]	+92% h _{Local} , $\phi=0,15\%$; mesmo Re +150% h _{Local} , $\phi=0,45\%$; mesmo Re
Meyer, <i>et al.</i> (2013)	Laminar, Transição e Turbulento	MWCNT/água funcionalizados	+33 do h para $\phi=1\%$, mesmo Re. -12,6 do h para $\phi=1\%$, mesma velocidade.
Sundar, <i>et al.</i> (2014)	Turbulento	MWCNT-Fe ₃ O ₄ /água	+31,1 do Nu; $\phi=0,3\%$; mesmo Re.
Nazari, <i>et al.</i> (2014)	Turbulento	Al ₂ O ₃ /água CNT/água	+6% do h; $\phi=0,5\%$ +13% do; $\phi=0,25\%$, Mesma velocidade
Haghighi, <i>et al.</i> (2014)	Turbulento	TiO ₂ /água e Al ₂ O ₃ /água	+15%, mesmo Re. -10%, mesma \dot{W} de bombeamento.
Cárdenas Gómez, <i>et al.</i> (2015)	Turbulento	MWCNT facilmente dispersíveis/água	+12,5% do h; $\phi=0,12\%$ e r=600 +27% do h; $\phi=0,24\%$ e r=100 +30% do h; $\phi=0,24\%$ e r=2400 Para mesmo Re -1% do h; $\phi=0,12\%$ e r=600 -2% do h; $\phi=0,24\%$ e r=100 +6% do h; $\phi=0,24\%$ e r=2400 Para mesma velocidade.

Continua na página seguinte

Autor	Regime	Nanofluido	Incremento do h (%)
Sadeghinezhad, et al; (2015)	Turbulento	Grafeno/água	+79% do Nu; $\phi_{wt}=0,1\%$; mesmo Re
Huang, et al. (2015)	Laminar	Al ₂ O ₃ /água MWCNT/água	-7.5% do h para $\phi=2,84\%$ -15.5% do h para $\phi=0,055\%$ Para mesma velocidade
Zubir et al. (2015)	Turbulento	GO/água	+144% do Nu, mesmo Re
Shahrul, et al. (2016)	Laminar	ZnO/água-(PVP), Al ₂ O ₃ /água e SiO ₂ /água	+50% do h; para $\phi=0,3\%$ +15% do h; para $\phi=0,5\%$ +9% do h; para $\phi=0,5\%$ Para mesma velocidade
Hamid, et al. (2016)	Turbulento	TiO ₂ /EG-água	+29% do h; para $\phi=1,5\%$; mesmo Re
Zanjani, et al. (2016)	Laminar	Grafeno/água	+14% do h; $\phi=0,02\%$; mesmo Re
Hekmatipour, et al., (2016)	Laminar	CuO/óleo térmico	+22% do Nu; $\phi_{wt}=1,5\%$; mesmo Re
Cárdenas Gómez, et al. (2017)	Turbulento	Ag/água SWCNT/água Ag/água SWCNT/água	+10% do h; $\phi=0,5\%$; mesmo Re +34% do h; $\phi=0,21\%$; mesmo Re +5,5% do h; $\phi=0,5\%$ -13,5% do h; $\phi=0,21\%$ Para mesma velocidade.
Jafarimoghaddam, et al., (2017)	Laminar	Cu/óleo térmico	+17% do Nu; $\phi=0,17\%$; mesmo Re
Phanindra, et al., (2018)	Laminar	Al ₂ O ₃ -Cu/óleo transformador	+12% do Nu; $\phi=0,1\%$; mesmo Re
Presente Trabalho	Laminar	Ag/óleo CNT/óleo	$\approx h$, para Re<100 +7,6% do h, Re<100
	Laminar e turbulento	Ag/(H ₂ O:EG) CNT/(H ₂ O:EG) DI/(H ₂ O:EG) Al ₂ O ₃ /(H ₂ O:EG)	+14% do h, para Re>3000 +10% do h, para Re>3000 +12% do h, para Re>3000 $\approx h$ para Re>3000

2.6. Perda de carga e fator de atrito em escoamento interno de nanofluidos

Quando é analisada a transferência de calor por convecção interna forçada, seja em escoamento laminar o 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.

Uma das primeiras pesquisas que abordou a queda de pressão para escoamento interno em tubos foi a realizada por Xuan e Li (2003), eles expressaram que além de considerar características de intensificação de troca térmica é necessário saber sobre a resistência ao escoamento de nanofluidos. Nesse trabalho, foi determinado a fator de atrito (f) para nanofluidos de CuO/água com concentrações 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 poderia ser determinado por intermédio de uma correlação clássica para escoamento monofásico.

Ko, *et al.* (2007), reportaram em seu trabalho experimental características sobre o escoamento de duas dispersões aquosas de nanotubos de carbono. Em uma dispersão foi adicionado um tensoativo para manter a estabilidade e, na outra dispersão, empregaram-se CNT contendo grupos funcionais oxigenados na superfície do nanotubo, que foram criados pelo tratamento ácido. Eles mostraram 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.

Nos trabalhos realizado por Baby e Ramaprabhu (2011(a)) e Baby e Ramaprabhu (2011(b)) o aumento da queda de pressão na tubulação da seção de teste era devido aos movimentos migratório das partículas por causa da taxa de cisalhamento e a energia superficial da nanopartículas que favorece ao processo de aglomeração e sedimentação, e em consequência, para manter a capacidade da transferência de calor é necessária uma demanda adicional de energia. No entanto, algumas pesquisa afirmaram que a adição de nanopartículas pode intensificar de transferência de calor do nanofluido sem provocar uma penalidade extra na potência de bombeamento, Yang *et al.*, (2011) e Zanjani *et al.* (2016). Nessa mesma linha de raciocínio, Zubir, *et al.* (2015) afirmaram que os baixos incrementos para o fator de atrito e para a perda de carga em relação ao fluido base favorecem o uso potencial do nanofluido em sistemas de transporte térmico.

Outros afirmam que apesar do incremento da perda de carga, o desempenho do nanofluido ainda é melhor que o fluido base. No trabalho Sadeghinezhad, *et al.*; (2015) o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido de grafeno foi maior em cerca de 160% para uma concentração em massa de 0,1% quando comparado à água e a perda de carga variou entre 0,4% a 14,6% para Reynolds variando entre 5000 e 22000. Eles afirmaram que os nanofluidos de grafeno podem funcionar bem como fluido de trabalho em aplicações de transferência de calor e ser uma boa alternativa para fluidos convencionais.

Os pesquisadores também tem dedicado seus esforços em verificar se os modelos teóricos existentes para determinar o comportamento fluidodinâmico dos fluidos convencionais podem ser adotados para determinar também os comportamentos fluidodinâmicos do nanofluido. Portanto, autores como Williams, *et al.* (2008), mediram a

queda de pressão para água e para nanofluidos escoando no interior de um tubo horizontal em regime turbulento, completamente desenvolvido, sob duas condições, uma onde o tubo estava aquecido e a outra sem aquecimento. Isto foi realizado para explorar possíveis efeitos do gradiente de temperatura sobre a queda de pressão em nanofluidos. Seus resultados mostraram que para nanofluidos de Al_2O_3 /água com concentrações em volume 0,9%, 1,8% e 3,6% e nanofluidos de ZrO_2 /água com concentrações em volume 0,2%, 0,5% e 0,9%, a queda de pressão pode ser prevista dentro de uma incerteza de $\pm 10\%$, pelo modelo teórico, determinando previamente o fator de atrito pela correlação clássica de Blasius para $\text{Re} < 30000$ ou pela correlação clássica de McAdams para $\text{Re} > 30000$.

Duangthongsuk e Wongwises (2010) e Fotukian e Esfahany (2010), mostraram que para nanofluidos de TiO_2 /água, com concentrações em volume inferiores a 2% e Al_2O_3 /água com concentrações em volume inferiores a 0,135%, em escoamento plenamente desenvolvido em regime turbulento, os fatores de atrito de todas amostras calculados a partir da medida da queda de pressão na seção de teste, apresentaram uma boa concordância com os valores que foram obtidos pela correlação clássica Colebrook para água.

Meyer, *et al.* (2013), determinaram experimentalmente o fator de atrito de nanofluidos MWCNT/água para mais de 80 pontos, compreendidos na faixa do número de Reynolds de 1000 até 8000. As medições da queda de pressão foram realizadas sem aquecimento da superfície externa do tubo para eliminar qualquer efeito da aceleração. Seus resultados foram comparados com os resultados de modelos teóricos de Poiseuille e Blasius. O modelo de Blasius apresentou um desvio médio para o fator de atrito de 3,3% para regime laminar e de 2,8% para regime turbulento, enquanto, para o modelo de Poiseuille o desvio médio foi 0,2% para regime turbulento e 0,5% para regime laminar em comparação com dados experimentais para o nanofluido.

Sundar, *et al.* (2014), obtiveram experimentalmente o fator de atrito por intermédio das medições da queda de pressão na seção de teste de nanofluidos de MWCNT- Fe_3O_4 /água escoando em uma faixa de número de Reynolds de 2500-22500. Eles observaram que os dados obtidos experimentalmente, para o fator de atrito do nanofluido, apresentaram um desvio máximo de $\pm 3\%$ comparado com as correlações de Blasius e Petukhov. Foi observado, também, que a queda de pressão do nanofluido para Re igual a 3000 foi 11% maior que a do fluido base e para Re igual a 22000 o aumento foi de 18%.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Para atingir o objetivo geral proposto que consiste em avaliar teórica e experimentalmente o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos a base de misturas água e etileno glicol (H₂O:EG 50:50 wt%) e a base de óleo térmico em escoamentos sem mudança de fase no interior de tubos horizontais, foram executadas previamente uma série de etapas que são apresentadas neste capítulo. A primeira seção do capítulo descreve o método de produção e verificação das concentrações volumétricas das amostras de nanofluido. A segunda seção trata-se das medições das propriedades termofísicas do nanofluido (Condutividade térmica, viscosidade, massa específica e peso específico). A terceira seção, descreve as modificações realizadas na bancada experimental para atingir as condições de teste desejadas. A última seção apresenta a avaliação, verificação e validação da bancada experimental construída para determinar o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão durante o escoamento dos fluidos.

3.1. Preparação das amostras de nanofluido

As amostras de nanofluidos foram realizadas com a aplicação do método de dois passos. Nesse sentido, as nanopartículas utilizadas foram adquiridas em forma de pó de uma solução funcionalizada de alta concentração em massa de nanopartículas e dispersas em dois tipos de fluidos base. O primeiro tipo é uma mistura de água e etileno glicol com 50% de concentração massa de cada substância (H₂O:EG 50:50 wt%). O segundo fluido base utilizado é o óleo térmico LUBRAX OT-100 fornecido pela PETROBRAS, cujas características e propriedades termofísicas são apresentadas no APÊNDICE III. Assim, a seguir é descrito

com detalhe as principais características no processo de produção das amostras de nanofluido.

3.1.1. Nanofluidos a base da mistura água e etileno glicol ($H_2O:EG$ 50:50 wt%)

Para produzir os nanofluidos a base de misturas água e etileno glicol ($H_2O:EG$ 50:50 wt%), estabeleceu-se uma rotina descrita na Fig. 3.1, definida previamente, que foi igualmente aplicada na síntese de todas as amostras. Foram utilizadas nanopartículas de dois categorias diferentes de materiais base, nanopartículas a base de carbono (Nanotubos de carbono e diamante) e nanopartículas a base de materiais inorgânicos (Metais e óxidos metálicos), com diferente morfologia e tamanho de nanopartículas como pode ser observado na Tab. 3.1.

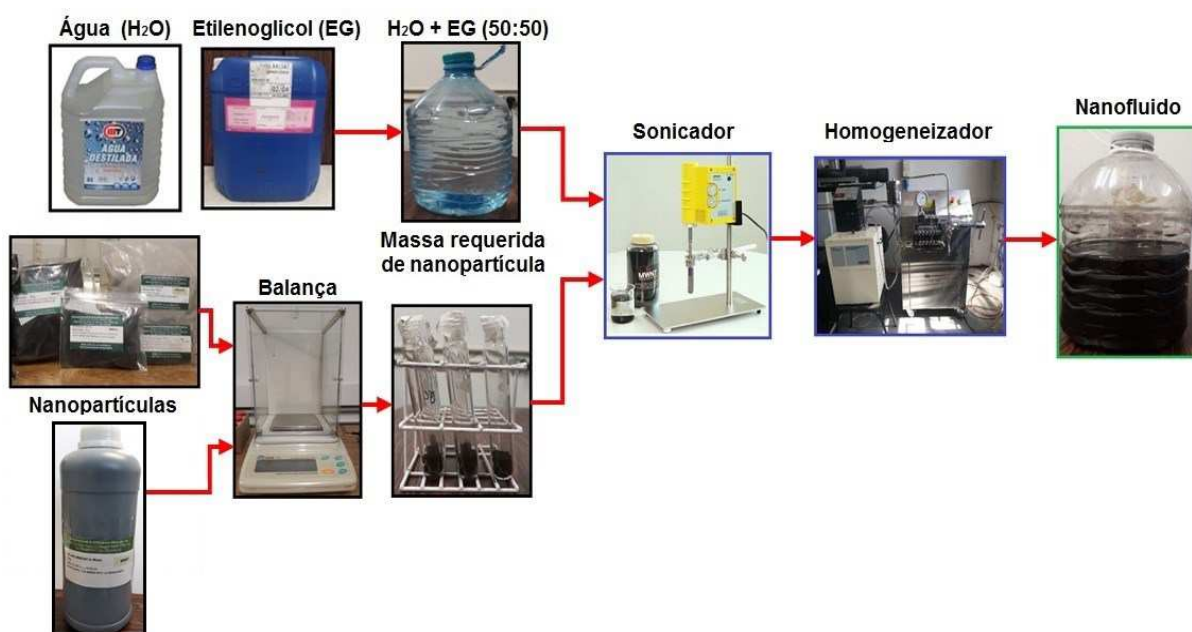


Figura 3.1 - Processo de produção de nanofluidos.

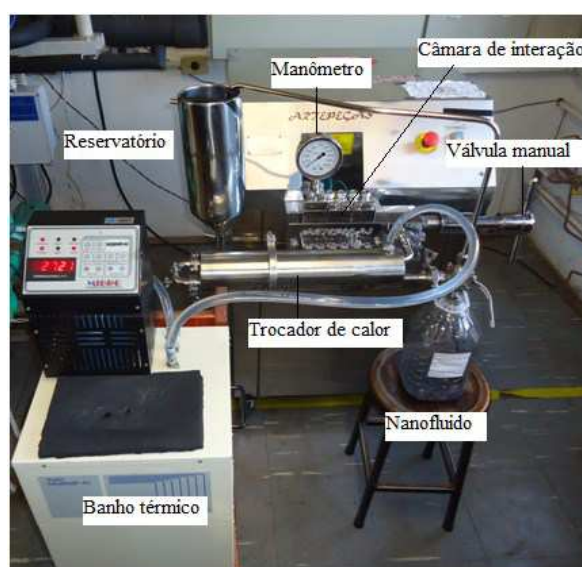
Portanto, as amostras de nanofluido produzido foram resultado de um processo de dispersão, sonicação e homogeneização de nanopartículas em forma de pó ou de uma solução funcionalizada de alta concentração em massa de nanopartículas. Tanto as nanopartículas em pó, como as soluções funcionalizadas¹ de alta concentração a base de água foram fornecidas pela Nanostructures & Amorphous Material, onde as propriedades físicas (massa específica, e o calor específico) e as características geométricas e morfológicas das nanopartículas foram fornecidas pelo fabricante.

¹ Solução Funcionalizada: Nanofluido onde as nanopartículas são revestidas com moléculas orgânicas ligadas à superfície externa conferindo-lhes características físico-químicas desses grupos

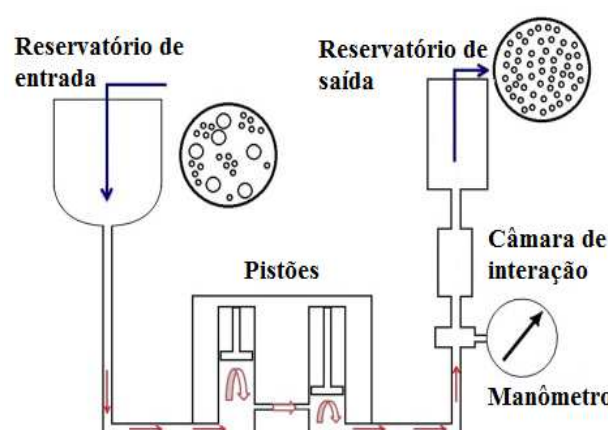
Tabela 3.1 Características das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido.

Nanopartículas	Nome dado	Formato de Procedência	Morfologia	d [nm]	L [μm]	ρ_{np} [g/cm ³]	C_{pnp} [kJ/kgK]
Prata (Ag)	Ag_20	Pó	Esférica	20	-	10,49	0,2343
Prata (Ag)	Ag_20	Pó	Esférica	80	-	10,49	0,2343
Alumina (Al ₂ O ₃)	Al	Pó	Esférica	40-80	-	3,7	0,8491
Diamante (C)	DO	Pó	Esférica	3-6	-	3,52	0,5091
MWCNT	CNT_800	Solução funcionalizada (4,09 wt%) r=d/L=800	Nanotubo	20-30	10-30	2,1	0,71
MWCNT	CNT_300	Solução funcionalizada (12,12 wt%) r=d/L=300	Nanotubo	>50	10-20	2,1	0,71

A rotina começa com a mistura de etilenoglicol e água com concentração de 50% em massa de água e 50% de etilenoglicol, na sequência é homogeneizado o fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%). Uma vez finalizada a homogeneização do fluido base, em seguida são medidas e separadas as massas necessárias de fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%) e de nanopartículas que obedecem às concentrações estabelecidas. As nanopartículas são adicionadas na mistura, e seguidamente são sonicadas aplicando uma potência de 750 W com frequência de 20khz. Este processo de sonicação é realizado de 30 a 35 minutos, controlando o aumento de temperatura (<50°C). Uma vez finalizado o processo de sonicação as amostras são submetidas em um processo de homogeneização. Para isto é utilizado novamente o homogeneizador de alta pressão do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-UFU adquirido da empresa Artepeças Ltda e mostrado na Fig. 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2 - (a) Homogeneizador de alta pressão. (b) Esquema do processo de homogeneização. Bandarra Filho *et al.* (2014)

O equipamento é composto por três pistões acionados por um mecanismo motor-polia, um manômetro para visualizar a pressão interna do sistema onde a pressão é controlada pelo acionamento manual de uma válvula. O sistema tem capacidade de operar com aproximadamente 5 L. O tempo estipulado para o processo de homogeneização variou entre 35 e 40 minutos por amostra. A Fig. 3.2a apresenta o equipamento utilizado na produção das amostras de nanofluidos e a Fig. 3.2b apresenta um diagrama esquematizado do processo de homogeneização de alta pressão. O equipamento também possui a capacidade de exercer uma pressão máxima de 1600 bar. No entanto, para efetuar o processo de homogeneização das amostras foram aplicados 400 bar. O equipamento opera conjuntamente com um banho térmico, já que devido às altas taxas de cisalhamento entre os pistões e o fluido homogeneizado causam um aumento na temperatura do fluido que precisa ser controlada para não afetar a estabilidade das amostras. A limpeza do equipamento no intervalo de produção de uma amostra para outra foi realizada com próprio fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%) para não contaminar o restante das amostras produzidas.

Para determinar a quantidade de massa de nanopartículas e do fluido base foi desenvolvida uma rotina no software EES, o código desenvolvido está apresentado no APÊNDICE IV. Nesse sentido, foram previamente definidas a concentração volumétrica desejada para cada nanofluido e o volume final ($V_{\text{final}} = 3500 \text{ ml}$). No total foram produzidas 21 amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), como é descrito na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Descrição das amostras de nanofluido produzidos.

Nome da amostra	Nanopartícula /diâmetro [nm]	Fluido de base	[% Vol.] ϕ	[% massa] wt
Ag_20_1	Ag/20	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0493
Ag_20_2	Ag/20	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0986
Ag_20_3	Ag/20	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,4915
Ag_80_1	Ag/80	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0493
Ag_80_2	Ag/80	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0986
Ag_80_3	Ag/80	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,4915
Al ₂ O ₃ _1	Al ₂ O ₃ /[40-80]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0174
Al ₂ O ₃ _2	Al ₂ O ₃ /[40-80]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0348
Al ₂ O ₃ _3	Al ₂ O ₃ /[40-80]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,1739
DO_1	DO/[3-6]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,001	0,0033
DO_2	DO/[3-6]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0165
DO_3	DO/[3-6]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0331
DO_4	DO/[3-6]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,1655
CNT_300_1	MWCNT/~50	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,001	0,0019
CNT_300_2	MWCNT/~50	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0098

Continua na página seguinte

Nome da amostra	Nanopartícula /diâmetro [nm]	Fluido de base	[% Vol.] ϕ	[% massa] wt
CNT_300_3	MWCNT/~50	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0197
CNT_300_4	MWCNT/~50	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,0988
CNT_800_1	MWCNT/[20-30]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,001	0,0019
CNT_800_2	MWCNT/[20-30]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,005	0,0098
CNT_800_3	MWCNT/[20-30]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,010	0,0197
CNT_800_4	MWCNT/[20-30]	H ₂ O:EG 50:50 wt%	0,050	0,0988

Foi previamente estabelecido um volume final de 3500 ml, já que um volume 2500 ml é requerido para a realização dos testes da avaliação do desempenho termo-hidráulico na bancada experimental, enquanto o restante foi utilizado para realizar medição das propriedades como viscosidade e condutividade térmica.

Foram realizados testes de gravimetria por evaporação de pequenas amostras, a fim de verificar a concentração volumétrica final dos nanofluidos antes de serem testados na bancada experimental. A Tab. 3.3, apresenta os resultados dos testes de gravimetria com a percentagem de decrementos de concentração volumétrica (ϕ_{vol}) e concentração mássica (ϕ_{wt}) de nanopartículas por amostra de nanofluido produzido.

Tabela 3.3 - Comparação entre a concentração volumétrica e mássica estimada e a medida após da produção dos nanofluidos.

Amostra	ϕ_{vol} [%] (Estimada)	ϕ_{vol} [%] (Após preparação)	Decremento de ϕ_{vol} [%]	ϕ_{wt} [%] (Estimada)	ϕ_{wt} [%] (Após preparação)	Decremento de ϕ_{wt} [%]
Ag_20_1	0,005	0,0044	11,50	0,0493	0,0434	11,92
Ag_20_2	0,010	0,0093	7,28	0,0986	0,0917	6,96
Ag_20_3	0,050	0,0480	4,10	0,4915	0,4719	3,99
Ag_80_1	0,005	0,0045	9,67	0,0493	0,0444	9,92
Ag_80_2	0,010	0,0095	4,53	0,0986	0,0937	4,96
Ag_80_3	0,050	0,0491	1,85	0,4915	0,4826	1,80
Al ₂ O ₃ _1	0,005	0,0045	9,28	0,0174	0,0157	9,93
Al ₂ O ₃ _2	0,010	0,0096	4,02	0,0348	0,0334	3,93
Al ₂ O ₃ _3	0,050	0,0492	1,58	0,1739	0,1712	1,57
DO_1	0,001	0,0009	12,78	0,0033	0,0030	9,62
DO_2	0,005	0,0044	12,33	0,0165	0,0146	11,64
DO_3	0,010	0,0093	6,91	0,0331	0,0308	6,91
DO_4	0,050	0,0486	2,75	0,1655	0,1609	2,80

Continua na seguinte página

Amostra	$\phi_{vol} [\%]$ (Estimada)	$\phi_{vol} [\%]$ (Após preparação)	Decremento de $\phi_{vol} [\%]$	$\phi_{wt} [\%]$ (Estimada)	$\phi_{wt} [\%]$ (Após preparação)	Decremento de $\phi_{wt} [\%]$
CNT_300_1	0,001	0,0009	11,13	0,0019	0,0018	6,37
CNT_300_2	0,005	0,0045	9,13	0,0098	0,0089	9,22
CNT_300_3	0,010	0,0097	3,25	0,0197	0,0192	2,64
CNT_300_4	0,050	0,0489	2,26	0,0988	0,0966	2,20
CNT_800_1	0,001	0,0009	11,31	0,0019	0,0018	6,37
CNT_800_2	0,005	0,0046	8,35	0,0098	0,0091	7,20
CNT_800_3	0,010	0,0097	3,15	0,0197	0,0192	2,64
CNT_800_4	0,050	0,0493	1,43	0,0988	0,0974	1,40

Na avaliação da estabilidade de nanofluidos, alguns dos métodos comumente empregados são: métodos de sedimentação e centrifugação, análise do potencial Zeta, método de microscopia absoluta e análise de absorção espectral. É importante destacar que, neste trabalho não foram empregados tais métodos para verificar a estabilidade, mesmo assim são descritas e mencionadas algumas características presenciadas após da produção de nanofluidos. Uma vez produzidas as amostras de nanofluido a base de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%), foram separadas pequenas quantidades (<500 ml) em garrafas de plástico transparentes e deixadas em repouso como mostrado nas Figs. 3.3, 3.4, e 3.5.

Assim, a Fig. 3.3 apresenta as amostras de nanofluido produzidos com nanopartículas de prata de 20 e 80 nm (Ag_20 e Ag_80). Podem ser observadas as amostras de nanofluido (Ag_20 e Ag_80), 24 horas após de produzidas nas Figs. 3.3a e 3.3c, respectivamente. As Figs. 3.3b e 3.3d apresentam as mesmas amostras dois meses após de produzidas. Portanto, nestas imagens pode ser observado que todas as amostras são em aspecto visualmente estáveis. Este comportamento pode ser atribuído ao processo de produção do nanofluido, assim como, ao revestimento das nanopartículas com aproximadamente 0,3% em massa de PVP (polivinilpirrolidona) como descrito pelo fabricante. É importante destacar, que as amostras de nanofluido com nanopartículas de prata de 80 nm apresentaram um maior depósitos de nanopartículas no fundo das garrafas após de dois meses de produzidas quando comparada com as amostras de nanofluido com nanopartículas de prata de 20 nm, isto pode ser devido ao tamanho da nanopartícula que favorece ao aumento de velocidade de sedimentação como descrito por (GHADIMI, SAIDUR e METSELAAR, 2011).



Figura 3.3 – Nanofluidos de prata (a) Amostras (Ag_20) 24 horas após da produção. (b) Amostras (Ag_20) após de dois meses de produzidas. (c) Amostras (Ag_80) 24 horas após da produção. (d) Amostras (Ag_80) após de dois meses de produzidas.

A figura 3.4 apresenta as amostras de nanofluido produzidos com a base de carbono, diamante e nanotubos de carbono de parede múltipla (DO, CNT_300 e CNT_800). Podem ser observados as amostras de nanofluido após 24 horas de produzidas (DO, CNT_300 e CNT_800) nas Figs. 3.4a e 3.4c e 3.4e respectivamente. As Figs. 3.4b, 3.4d e 3.4f apresentam as mesmas amostras um mês após de produzidas.

Portando, é importante enfatizar que as nanopartículas de diamante (DO) foram dispersas satisfatoriamente aplicando a metodologia descrita na Fig. 3.1, isto devido à funcionalização da superfície das nanopartículas como descrito pelo fabricante, que através da adição de grupos orgânicos como grupos carboxila (-COOH) e hidroxilas (-OH) melhoram a dispersão das nanopartículas hidrofóbicas. No entanto, as amostras de nanofluido de diamante, (DO) após um mês de produzidas apresentaram visualmente um comportamento de sedimentação como pode ser visto nas Figs. 3.4a e 3.4b.



Figura 3.4 – Nanofluidos com nanopartículas a base de carbono (a) Amostras (DO) 24 horas após da produção. (b) Amostras (DO) após de um mês de produzidas. (c) Amostras (CNT_300) 24 horas após da produção. (d) Amostras (CNT_300) após de um mês de produzidas. (e) Amostras (CNT_800) 24 horas após da produção. (f) Amostras (CNT_800) após de um mês de produzidas.

As amostras de nanofluido (CNT_300 e CNT_800), que foram produzidas a partir de uma solução funcionalizada de nanotubos de carbono de parede múltipla a base de água com uma elevada concentração massa de nanopartícula como descrito na tab. 3.1, apresentaram o melhor comportamento em termos de estabilidade adotando o critério visual de comparação como pode ser visualizado nas Figs. 3.4d e 3.4f. Estas amostras não apresentaram depósitos de nanopartículas no fundo das garrafas após de um mês de produzidas quando comparada

com as amostras de nanofluido diamante (DO). No entanto, é importante evidenciar que as soluções funcionalizadas de nanopartícula de nanotubos de carbono de parede múltipla contem de 1,8 a 2% de concentração mássica de surfactante, como descrito pelo fabricante, porém, o surfactante não é especificado pelo fabricante. Isto pode ter contribuído à estabilidade das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono de parede múltipla (CNT_300 e CNT_800).

As Figs. 3.5a e 3.5b apresentam as amostras de nanofluidos de alumina (Al_2O_3) uma hora após de produzidas e 24 horas após de produzidas, respectivamente. Nessas imagens pode ser observado que as nanopartículas foram dispersas satisfatoriamente no fluido base, mas, não apresentaram uma boa estabilidade adotando o critério visual de comparação. O efeito da rápida sedimentação nas amostras de nanofluidos de Al_2O_3 é atribuído à ausência de algum tipo agente tensoativo que favorece à estabilidade das amostras.



Figura 3.5 –Nanofluidos de Alumina Al_2O_3 (a) Uma hora após da produção. (b) 24 hora após da produção.

3.1.2. Nanofluidos a base de óleo térmico OT-100

Para produzir os nanofluidos de nanotubo a base de óleo térmico OT-100 fornecido pela Petrobras, a rotina aplicada na síntese de todas as amostras foi ligeiramente alterada à implementada para as amostras de nanofluidos a base de ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%). Assim, o processo de produção de nanofluidos a base de óleo térmico é descrita pela Fig. 3.6. Também, foram utilizadas nanopartículas de dois categorias diferentes de materiais base, nanopartículas a base de carbono (Nanotubos de carbono) e nanopartículas a base de materiais inorgânicos (Metais-Ag), com diferente morfologia e tamanho de nanopartículas. Assim as características geométricas e morfológicas das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluidos a base de óleo é descrita na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 Características das nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido.

Nanopartículas	Nome dado	Formato de Procedência	Morfologia	d [nm]	L [μm]	ρ_{np} [g/cm ³]	C_{pnp} [kJ/kgK]
Prata (Ag)	Ag_80	Pó	Esférica	80	-	10,49	0,2343
MWCNT	CNT_800	Solução funcionalizada (4,09 wt%) $r=d/L=800$	Nanotubo	20-30	10-30	2.1	0,71

A principal diferença do processo de produção entre os nanofluidos a base de óleo térmico e os nanofluidos a base de H₂O:EG 50:50 wt% é não utilização do homogeneizador por alta pressão descrito na Fig. 3.2, devido à grande possibilidade da contaminação das amostras por algum agente externo e à contaminação entre amostras pela dificuldade da limpeza do equipamento.

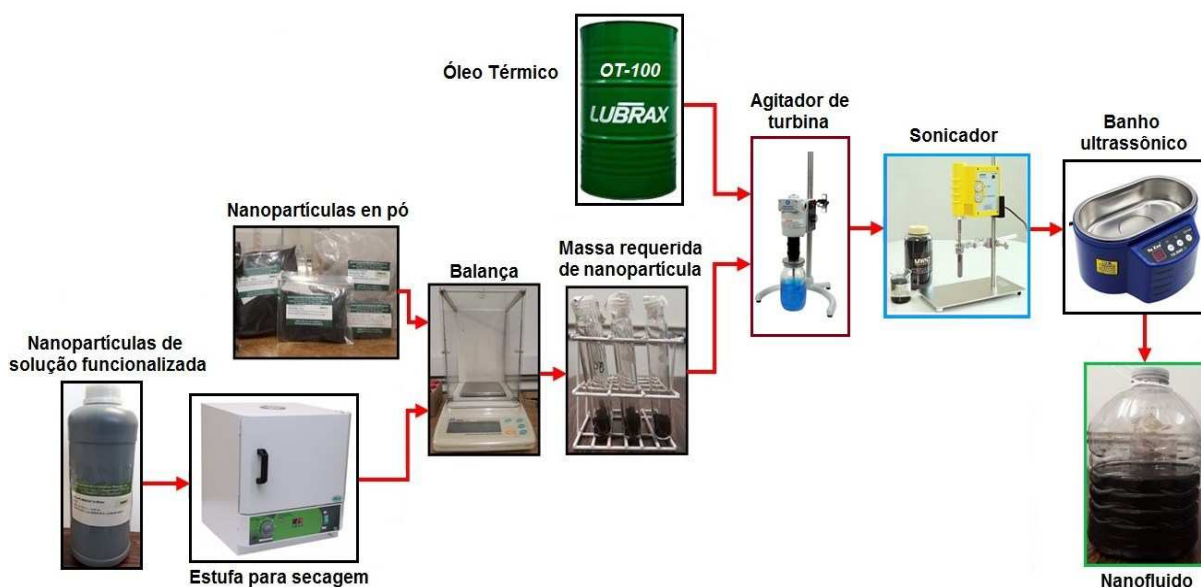


Figura 3.6 - Processo de produção de nanofluidos.

Nesse sentido, a rotina aplicada começa com a medição e separação das massas necessárias de fluido base (OT-100) e de nanopartículas que obedecem às concentrações previamente estabelecidas, destacando que, as nanopartículas de nanotubo de carbono provenientes da solução funcionalizada é primeiramente submetida a um processo de secagem com auxílio de uma estufa para a separação das nanopartículas. O processo de secagem é verificado com o auxílio de uma balança digital, onde a massa da amostra seca é conferida periodicamente até atingir um valor estável da massa seca de nanopartículas. Na sequência, a massa seca de nanopartícula é moída e peneirada até atingir a forma de pó. Devido à elevada viscosidade do óleo térmico é utilizado um agitador de turbina para facilitar a dispersão das nanopartículas dentro do fluido base. Uma vez finalizado este primeiro

processo, cada amostra é sonicada aplicando uma potência de 750 W com frequência de 20kHz. Este processo de sonicação é realizado de 30 a 35 minutos. Uma vez finalizado o processo de sonicação as amostras são submetidas a um processo de sonicação por banho ultrassônico de baixa potência (50 W) e de alta duração (3 horas).

No total foram produzidas 6 amostras de nanofluido a base de óleo térmico LUBRAX (OT-100), como é descrito na Tab. 3.5, e não foram realizados testes de gravimetria para verificar a concentração volumétrica final dos nanofluidos antes de serem testados na bancada experimental. No entanto, com base nos resultados obtidos dos testes de gravimetria nas amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) foi considerada uma adição extra de massa de nanopartícula (5% a mais da massa de nanopartícula necessária para cada concentração).

Tabela 3.5 – Descrição das amostras de nanofluido produzidos a base de óleo térmico.

Nome da amostra	Nanopartícula /diâmetro [nm]	Fluido de base	[% Vol.] ϕ	[% massa] wt
OT-Ag_80_1	Ag/80	OT-100	0,005	0,0592
OT-Ag_80_2	Ag/80	OT-100	0,010	0,1183
OT-Ag_80_3	Ag/80	OT-100	0,050	0,5892
OT-CNT_800_1	MWCNT/[20-30]	OT-100	0,005	0,0119
OT-CNT_800_2	MWCNT/[20-30]	OT-100	0,010	0,0237
OT-CNT_800_3	MWCNT/[20-30]	OT-100	0,050	0,1185

Uma vez produzidas as amostras de nanofluido a base de óleo térmico, também foram separadas pequenas quantidades (<500 ml) dentro de garrafas de plástico transparentes e deixadas em repouso como mostrado nas Figs. 3.7 e 3.8.

Portanto, as Figs 3.7 e 3.8 apresentam as amostras de nanofluido produzidos com nanopartículas de prata de 80 nm (OT-Ag_80) e nanotubo de carbono de parede múltipla (OT-CNT_800), respectivamente. Nas Figs. 3.7a e 3.8a podem ser observados as amostras de nanofluido (OT-Ag_80) e (OT-CNT_800), 24 horas após de produzidas. Assim, nas imagens pode ser observado que todas as amostras apresentaram uma dispersão satisfatória das nanopartículas dentro do fluido base, validando o método de produção aplicado.

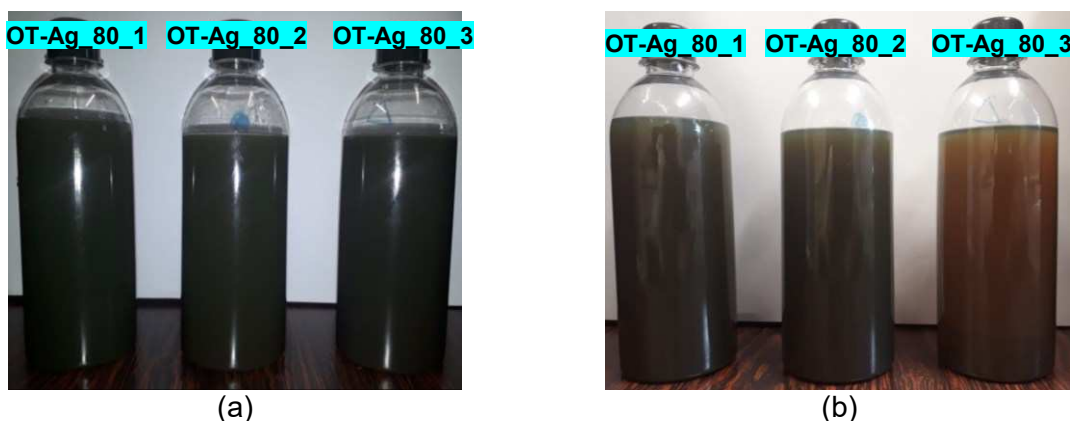


Figura 3.7 –Nanofluidos de prata (OT-Ag_80) a base de óleo térmico (a) 24 horas após da produção. (b) Um mês após da produção.

Por outro lado, as Figs. 3.7b e 3.8b apresentam as amostras de nanofluido (OT-Ag_80) e (OT-CNT_800), um mês após de produzidas. Pode ser observado na Fig. 3.7b que para a amostra com maior concentração de nanopartícula de prata (OT-Ag_80_3) foi visualmente evidenciado um processo de sedimentação de maior intensidade, quando comparado com as amostras de menor concentração de nanopartículas de prata. Isto pode ser atribuído, que a energia externa empregada no processo de dispersão da nanopartícula não foi suficiente para reduzir o tamanho do diâmetro médio do aglomerados de nanopartículas formados pela elevada energia superficial das nanopartículas (HWANG, LEE, *et al.*, 2008). Este comportamento foi também visualizado nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono de parede múltipla, onde as amostras apresentaram um processo de floculação como pode ser visto em detalhe na Fig. 3.8c.

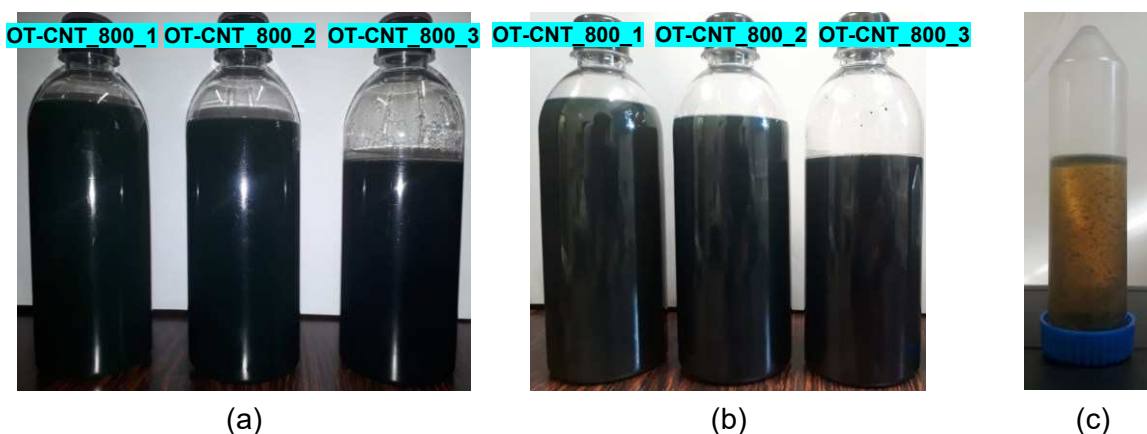


Figura 3.8 –Nanofluidos de nanotubo de carbono (OT-CNT_800) a base de óleo térmico (a) 24 horas após da produção. (b) um mês após da produção. (c) Floculação do nanofluido OT-CNT_800

3.2. Caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos

A etapa de caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos é um processo que foi realizado simultaneamente com outras etapas do trabalho. Uma vez preparadas as amostras de nanofluidos, foram caracterizadas para determinar suas propriedades termofísicas com os equipamentos que possui o laboratório LEST-nano. Principalmente foram medidas e avaliadas experimentalmente a massa específica, a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica de todas as amostras produzidas.

3.2.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica é medida por intermédio de um analisador de propriedades térmicas adquirida da Linseis (THB1 - Transient Hot Bridge). O método THB ou método transiente da ponte quente, é utilizado para medir as propriedades térmicas dos materiais. 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. 3.9. A sonda é em essência uma resistência de fio de níquel isolada com kapton, que funciona como uma fonte de calor contínua, e também possui um sensor de temperatura.



Figura 3.9 - Condutímetro Linseis e vista aproximada do sensor THB. Fonte: (OLIVEIRA, 2018)

A vantagem deste método em comparação com os métodos estacionários é que precisam de menos tempos de medição, e também possibilitam realizar uma medição

simultânea da difusividade térmica uma vez conhecida a massa específica do material ou fluido testado. 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 temperatura-tempo e das características geométricas da sonda, sob a hipótese que a sonda é uma fonte de calor pontual que está imersa em um meio homogêneo é isotrópico.

A configuração do equipamento experimental é apresentada na Fig. 3.10. Para atingir e manter as condições de temperatura desejadas foi utilizado um banho térmico. As amostras de fluido foram colocadas em uma cuba com volume de 20 ml fabricada em aço inox com dupla parede que possibilita a troca de calor com o fluido à temperatura controlada pelo banho térmico. A sonda de medição é inserida na amostra de fluido contida na cuba. A medição é realizada de modo automático uma vez que as condições de teste são atingidas. Os dados são adquiridos e processados através de um software THB Measurement desenvolvido pelo fabricante que está instalado no computador que opera em conjunto com o condutivímetro. A Tab. 3.6 apresenta os parâmetros determinados por intermédio do equipamento e a as incertezas de medição dentro respectivas faixas de operação.

Tabela 3.6- Propriedades do condutivímetro THB-1 Linseis fornecidas pelo fabricante.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza de medição
Condutividade térmica	0,01 a 1 [W/m.K]	< 2%
Difusividade térmica	0,05 a 10 [mm ² /s]	< 5%

As medições de condutividade térmica para as amostras de fluido foram realizadas em uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 60°C com incrementos de 10 °C. Para cada valor de temperatura são realizadas 20 medições. Portanto, os valores apresentados da condutividade térmica para cada valor de temperatura são resultado de um média aritmética das 20 medições realizadas. Os resultados das medições experimentais são apresentados no capítulo 4

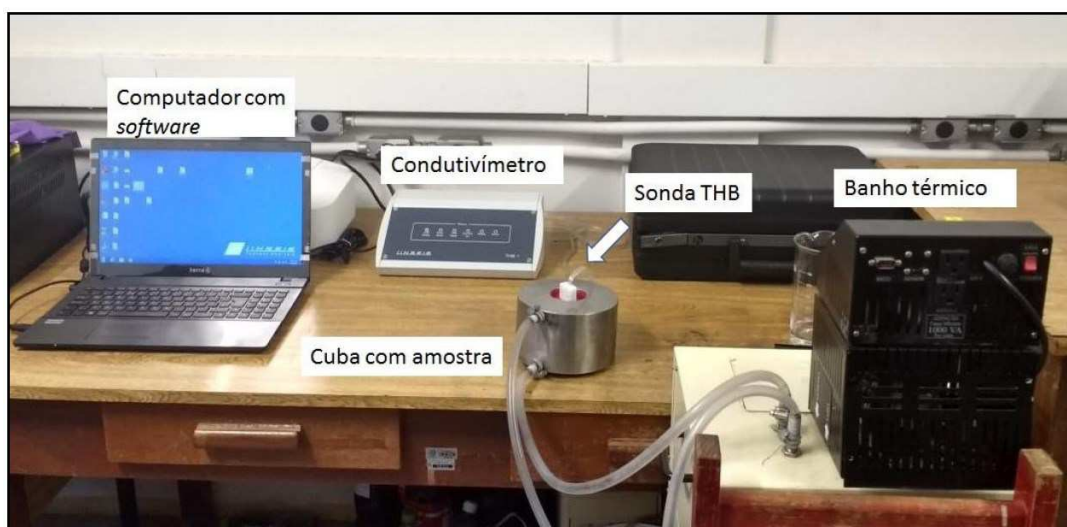


Figura 3.10- Aparato experimental para medição de condutividade térmica no laboratório LEST-nano. Fonte: (OLIVEIRA, 2018).

3.2.2. Viscosidade e massa específica

A massa específica e a viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido e do fluido base foram determinadas com o auxílio do viscosímetro fabricado pelo Anton Paar (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000) que pode ser visto na Fig. 3.11. O princípio físico para determinar a viscosidade é baseado no escoamento entre placas planas paralelas e infinitas.



Figura 3.11.-Equipamento experimental para determinar a massa específica e da viscosidade dinâmica das amostras.

O cilindro externo da célula de medição do viscosímetro Stabinger gira com uma velocidade constante dentro de uma carcaça de cobre com temperatura controlada. O cilindro interno com forma cônica possui uma massa específica menor que as amostras testadas.

Portanto, baixa massa específica permite que o cilindro interno flutue livremente dentro da amostra e seja centrado pela força centrífuga. Deste modo, se evita completamente as forças de atrito produzidas por rolamentos. A tensão de cisalhamento do fluido em rotação induz à rotação do rotor interno. Entretanto, uma corrente induzida pela carcaça de cobre age em um ímã giratório localizado dentro 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. Um desenho que esquematiza a célula de medição da viscosidade dinâmica é mostrando na Fig. 3.12.

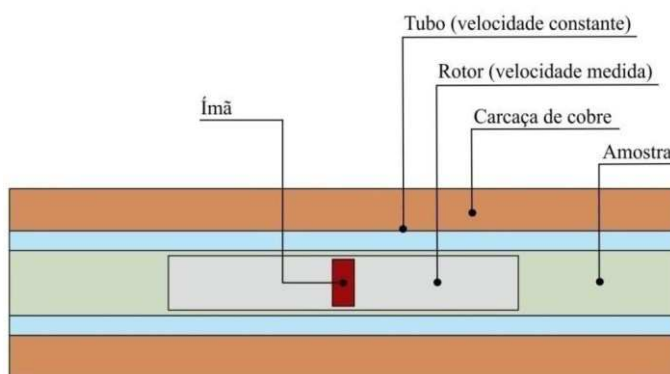


Figura 3.12- Representação esquematizada da célula de medição do viscosímetro modelo Stabinger™ SVM™ 3000. Fonte: Editado do manual de operação

O equipamento que precisa de uma pequena quantidade de amostra (~2,5 ml), também possui uma célula de medição da massa específica que opera de acordo com o princípio de oscilação do tubo em "U". Ambas as células (da viscosidade e da massa específica) são preenchidas na mesma operação, assim, as medições são realizadas simultaneamente. As medições de viscosidade dinâmica e da massa específica foram realizadas em uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 50°C com incrementos de 10 °C para as amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) e para as amostras a base de óleo térmico foram realizadas em uma faixa de temperatura compreendida entre 20 e 100°C com incrementos de 20 °C. Para cada valor de temperatura foram realizadas 6 medições. Portanto, 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. É importante enfatizar que, para cada intervalo de temperatura, antes de introduzir a amostra no equipamento foi realizada uma agitação com banho ultrassônico com duração de 5 minutos com intuito de manter a amostra o mais próximo possível à condição inicial após à produção e de minimizar a quantidade de ar condido na amostra, especificamente nos nanofluidos a

base de óleo térmico. De acordo com o fabricante as incertezas das medições de viscosidade, massa específica e temperatura, são apresentadas na Tab. 3.9

Tabela 3.7- Incerteza de medição fornecidas pelo fabricante.

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza de medição
Viscosidade dinâmica	0.2 a 20.000 [mPa.s]	$\pm 0,35\%$
Massa específica	0,65 a 3 [g/cm ³]	$\pm 0,0005$ g/cm ³
Temperatura	-56 a 105 [°C]	$\pm 0,02$ °C

3.2.3. Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido foi determinado, empregando um modelo baseado no equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante, assim, modelo matemático dado pela Eq. 2.5 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 das nanopartículas, ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão, $(\rho c_p)_{fb}$ e $(\rho c_p)_{np}$. Portanto, a massa específica do fluido base, ρ_{fb} , foi determinada por medições experimentais e o calor específico do fluido base, $c_{p,fb}$, foi obtido da base de dados do software EES no caso da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) ou fornecido pelo fabricante no caso do óleo térmico segundo a ficha técnica do óleo LUBRAX OT-100 apresentada no APÊNDICE III. As propriedades físicas das nanopartículas, calor específico, $c_{p,np}$, e massa específica, ρ_{np} , foram obtidas pelos dados fornecidos pela Nanostructures & Amorphous Material que são descritos nas Tab. 3.1.

3.3. Bancada Experimental

Quando trata-se de determinar as características da transferência de calor em condições como escoamento laminar não desenvolvido, escoamentos onde as propriedades variam muito com a temperatura ou escoamentos turbulentos que são representativos no projeto de trocadores de calor e equipamentos associados à transferência de calor, as soluções analíticas, quando possíveis são de um grau de dificuldade superior e nem sempre podem ser obtidas (HOLMAN, 1999). Neste sentido, torna-se necessária a aplicação de métodos experimentais.

Neste sentido, o equipamento experimental do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-nano da UFU é utilizada para determinar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor por convecção de fluidos e a perda de carga do fluido escoando monofásico em regime laminar e turbulento no interior de tubo circular reto e horizontal sob a condição de contorno de fluxo uniforme de calor e tem como o principal objetivo avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos. A bancada experimental foi idealizada e construída de tal forma que fosse possível realizar modificações para atender as condições específicas de ensaio conforme o desenvolvimento da pesquisa.

Portanto, a bancada experimental possui os atributos necessários para originar as condições fluidodinâmicas e térmicas necessárias a fim de obedecer às hipóteses e exigências teoricamente estabelecidas para a solução do problema em questão. Assim, a Fig. 3.13, apresenta o diagrama esquematizado da bancada experimental, disponível no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-nano que é constituída por: a seção de testes, o sistema de refrigeração, o sistema de escoamento e medição de vazão mássica, o sistema de preaquecimento e o sistema de monitoramento e aquisição de dados.

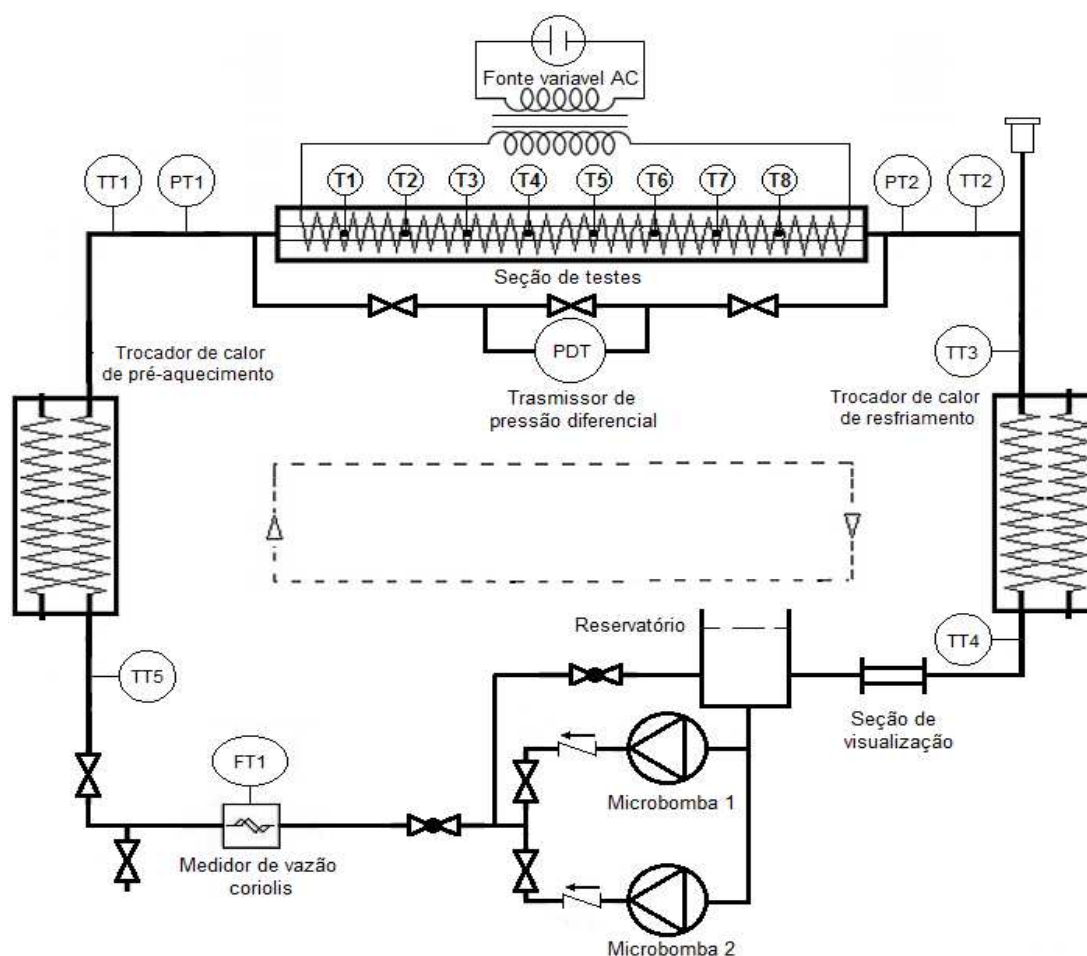


Figura 3.13 - Diagrama esquematizado da bancada experimental.

3.3.1. Seção de Testes

Um dos componentes que foi objeto de modificações para realizar experimentos do presente trabalho foi a seção de testes. Esta é constituída de tubo circular de latão de interior liso (fornecido por *Termomecânica S/A*) com diâmetro interno de 6,35 mm, diâmetro externo de 12,7 mm e espessura de parede de 3,175 mm, apresentando um comprimento total de 2480 mm.

Para o escoamento de um fluido em regime permanente no interior de um tubo liso como representado na Fig. 3.14, o princípio de conservação de energia que pode ser expresso em função da diferença das temperaturas médias de entrada e saída é descrito pela Eq. 3.1.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (3.1)$$

Onde $T_{m,s}$ e $T_{m,e}$ são as temperaturas médias de entrada e saída de entrada e saída da seção de teste, \dot{m} é a vazão mássica e \dot{Q} é a taxa de transferência calor para o fluido base. Entretanto, a transferência de calor é determinada pela definição do coeficiente local de transferência de calor por convecção obtido pela Eq. 3.2, denominada como lei de resfriamento de Newton.

$$q_s'' = h(T_{p(x)} - T_{m(x)}) \quad (3.2)$$

Onde $T_{p(x)}$ é a temperatura de parede registrada por 8 termopares tipo T e 8 PT100, colados na superfície do tubo ao longo da seção de teste. Sendo a condição de contorno de fluxo de calor constante, o parâmetro requerido para a solução do problema, é obtido finalmente o balanço de energia para o volume de controle descrito pela Eq. 3.3.

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

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

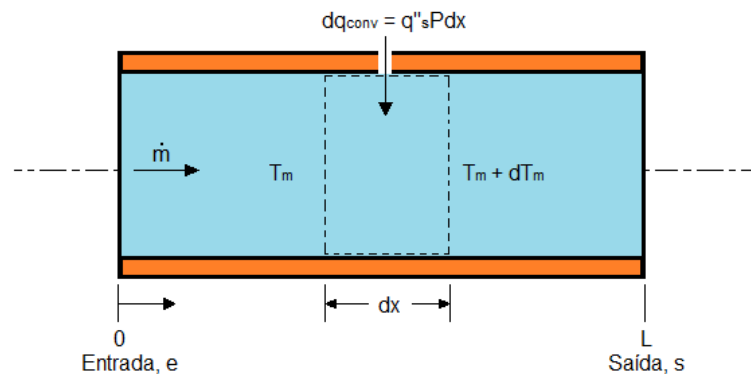


Figura 3.14 - Volume de controle para o balanço de energia.

A temperatura da parede é uma das medições mais complexas e delicadas, que necessita de uma atenção especial. Assim, para realizar esta medição com maior precisão foram colocados 8 termopares tipo T modelo *TT-T30SLE* (fornecidos pela *OMEGA ENGINEERING, INC.*), e 8 RTD do tipo PT100 distribuídos em 8 pontos ao longo da parede externa do tubo, deste modo cada um dos 8 pontos contém um termopar e um PT100 em posições previamente definidas, seguindo a metodologia proposta por SMOUT (1996) para medição de temperatura de parede. Ele menciona que a medição de temperatura de parede deve ser realizada sem colocar ortogonalmente a junção do termopar com a superfície aquecida. Assim, os instrumentos de medição de temperatura foram fixados em ranhuras confeccionadas no tubo em diferentes posições, a partir da entrada como mostrado na 3.15a. As ranhuras que facilitaram a fixação dos termopares e os PT100 nas posições axiais, possuem uma profundidade de 1,8 mm, uma largura de 3 mm e comprimento de 20 mm, conforme mostrado na Fig. 3.15b. O APÊNDICE I, apresenta o detalhe construtivo e calibração dos termopares.

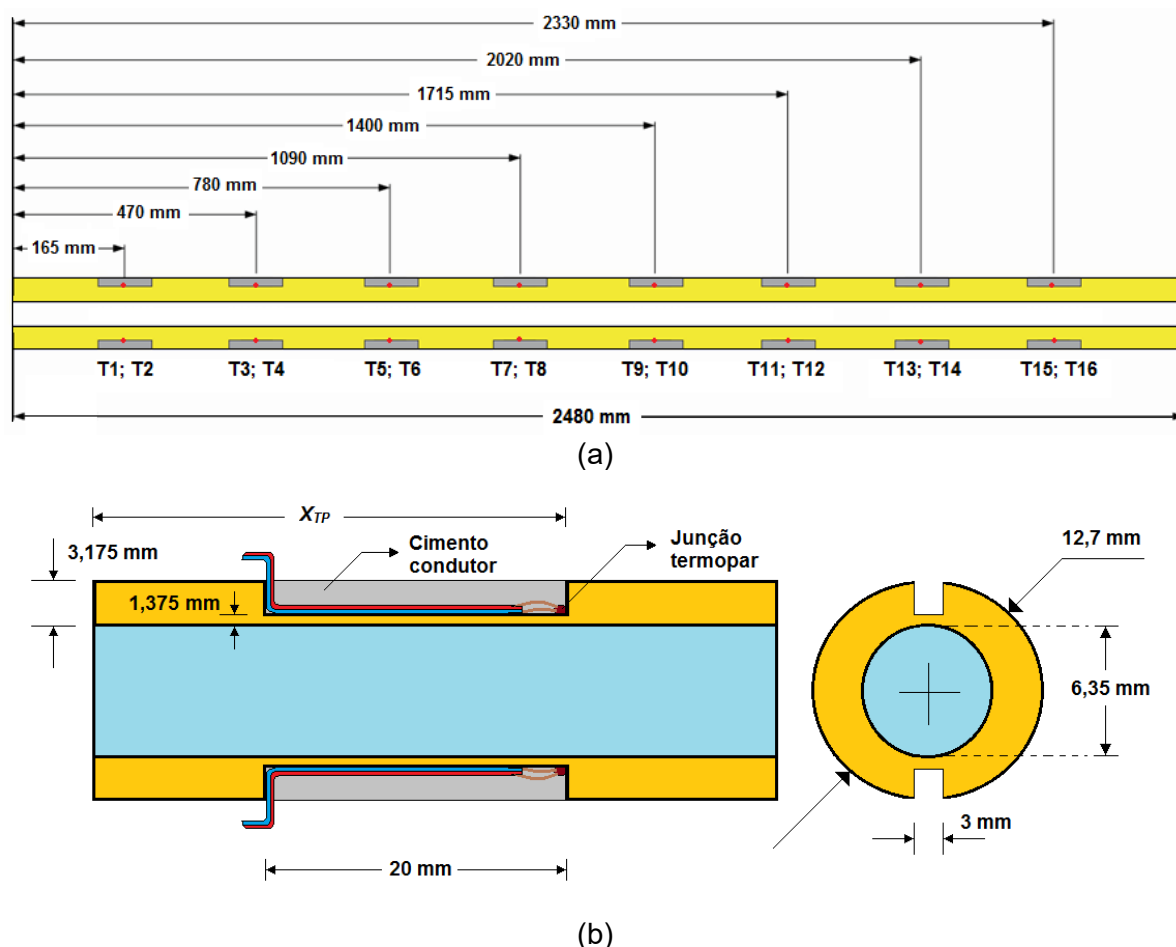


Figura 3.15 – Representação esquematizada na instalação da instalação dos instrumentos de medição de temperatura. (a) Posição de instalação na parede do tubo da seção de testes. (b) Vista frontal e lateral de um segmento da seção de teste.

Uma vez a superfície do tubo foi acondicionada para colocar os instrumentos de medição de temperatura, estes foram fixados dentro das ranhuras, adicionando uma ligeira camada de cola instantânea. É importante mencionar que a continuidade da corrente elétrica entre os dois fios do termopar foi verificada. Também foi verificada a resistência característica do PT100. Após a cola ter secado completamente, a ranhura foi recoberta com uma camada de cimento condutor tipo CCC 60-OMEGA (fornecido por *OMEGA ENGINEERING, INC*) e, finalmente, curada a camada de cimento, o excesso deste foi removido manualmente com auxílio de lixa. O resultado do procedimento pode ser observado na Fig. 3.16.



Figura 3.16 - Fixação dos termopares no tubo da seção de testes.

A condição de contorno de fluxo de calor constante aplicado à parede do tubo foi proporcionada pelo aquecimento de 12 resistências elétricas do tipo fita flexíveis, isoladas com poliamida, modelo KH serie 115 Volts 10W/in² – Flexible Heaters (fornecidas por *OMEGA ENGINEERING, INC.*). Estas fitas flexíveis foram enroladas e fixadas sobre toda a área externa do tubo da seção de teste com auxílio de fita adesiva de poliamida (*kapton – DUPONT®*). A Fig.3.17a, apresenta o resultado do procedimento realizado na fixação das resistências elétricas. A potência elétrica querida para efetuar o aquecimento das fitas resistivas foi controlada por meio de um variador de tensão monofásico (Variac) de 10 KVA e corrente máxima 40A, modelo *JNG-TDGC2-10* (fornecido por *iTesT Medição e Automação Ltda.*) mostrado na Fig. 3.17b.

A tensão e a corrente nas resistências de aquecimento da seção de teste foram medidas por intermédio das placas de aquisição de dados NI9242 e NI9246 respectivamente, as quais foram adquiridas da National instrument. No entanto, a tensão e a corrente do circuito de resistências foram verificadas contínua e simultaneamente por intermédio de um amperímetro

MESCO – DM-890 e um multímetro digital (PC-COMM MINIPA ET-2715 A - BRYMEN) respectivamente.

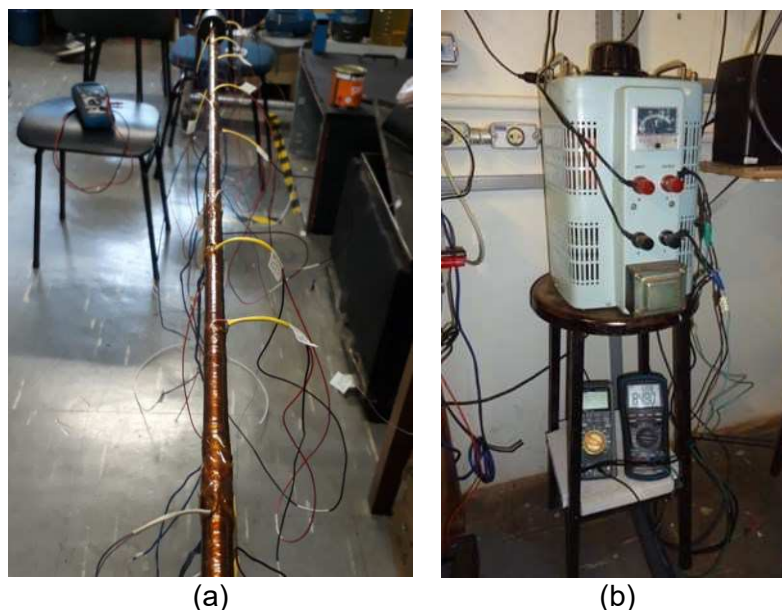


Figura 3.17 - Detalhes construtivos e operacionais da seção de teste. (a) Fixação das resistências tipo fita flexíveis. (b) Equipamentos (Variac, amperímetro e multímetro digital) do sistema de aquecimento da seção de testes.

A medição da temperatura média do fluido na entrada e na saída da seção de teste foi realizada por intermédio de dois transmissores de temperatura tipo RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detector*) modelo PT100 de três fios (fornecidos por *IOPE Instrumentos de precisão Ltda.*). Para a instalação destes instrumentos foi necessário a fabricação de peças de nylon, posicionadas logo após da saída do pré-aquecedor e na saída da seção de teste. O detalhe construtivo da peça permitiu que a bainha do sensor ficasse dentro da região de turbulência, ocasionada pela curva de 90°, como pode ser observado na Fig. 3.18.

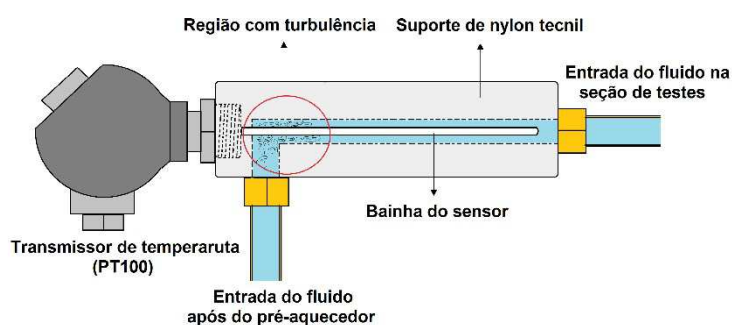
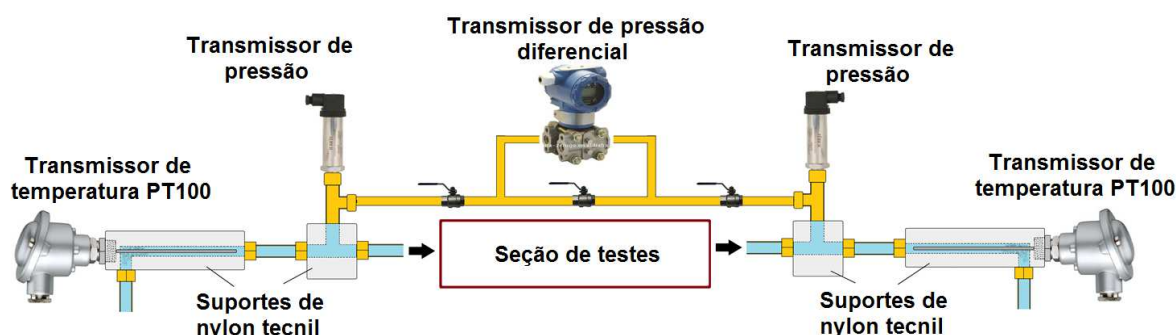


Figura 3.18- Detalhe da instalação dos transmissores de temperatura na entrada e saída da seção de testes.

Para realizar avaliação fluidodinâmica, a partir da medição a queda de pressão e o cálculo do fator de atrito, foram instalados dois transmissores de pressão de efeito piezo resistivo *PSI40* da *Zurich*, que medem a pressão manométrica na entrada e na saída da seção de teste. No entanto, também foi introduzido um transmissor de pressão diferencial, modelo *LD301* (fornecido por *ESMAR*), que permite registrar simultaneamente e, com maior exatidão, a queda de pressão na seção de teste. Estes instrumentos também precisaram da usinagem de peças especiais de nylon para fixação à seção de teste. As peças fabricadas de nylon não somente suportavam a instalação dos instrumentos de medição de pressão e temperatura, como também atuavam como isolantes que impediam tanto a perda de calor axial pelo tubo da seção. A Fig. 3.19a, apresenta um esquema estrutural da instalação dos instrumentos de medição na seção de testes. Finalmente, a seção de testes foi isolada termicamente com uma camada de lã de rocha de 25 mm de espessura e todo o conjunto foi recoberto como uma manta isolante de espuma elastomérica de borracha sintética com espessura de 20 mm como mostrado na Fig.3.19b.



(a)



(b)

Figura 3.19 – (a) Esquema estrutural da instalação dos instrumentos de medição na seção de testes. (b) Seção de teste isolada

3.3.2. Sistema de escoamento e medição de vazão mássica

O Sistema de escoamento e medição de vazão mássico está conformado de duas bombas de engrenagens com acoplamento magnético, duas válvulas eliminadoras de ar e um medidor de vazão mássica tipo Coriolis, como é mostrado na Fig. 3.20.

Os equipamentos responsáveis para manter o regime de escoamento do fluido no circuito principal são duas bombas de engrenagem com acoplamento magnético mostradas na Fig. 3.20a; uma microbomba com uma vazão máxima de 12.8 L/min (da série 4, modelo 45 fornecida por Liquiflo Chemical Precessing Pums Ltd.) e a outra microbomba com uma vazão máxima de 5,68 L/min (da série GK, modelo 114/114-56-C fornecida pela MICROPUMP). As duas bombas estão montadas em bloco com um motor elétrico de 0,5 CV. A energia elétrica consumida pelas bombas é fornecida por intermédio um inversor de frequência (modelo VLT 2800 fornecido por Danfoss), que manipula a rotação nos motores das bombas. Portanto, com o auxílio do inversor de frequência foi possível projetar e implementar um controle PID que permite realizar o controle preciso da vazão do fluido em escoamento com precisão de $\pm 0,1$ g/s do valor-alvo de vazão mássica “setpoint”. Foi realizado, também, um by-pass com uma válvula globo que permite uma manipulação da vazão para atingir as condições necessárias dos ensaios experimentais, além de proporcionar uma proteção por algum incremento repentino na pressão do sistema.

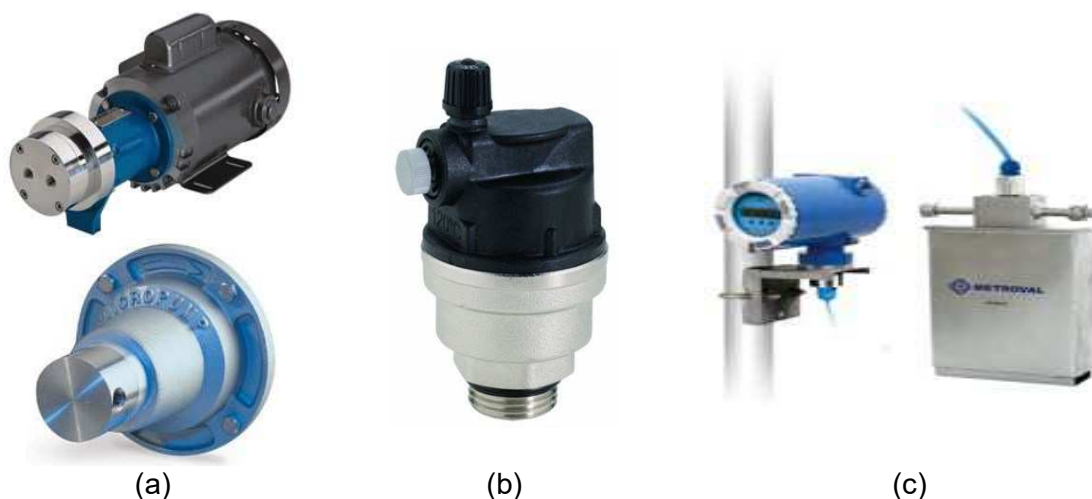


Figura 3.20 - (a) Bombas de engrenagens com acoplamento magnético. (b) Válvula eliminadora de ar. (c) Medidor de vazão mássica do tipo coriolis.

A bancada experimental possui no sistema de escoamento duas válvulas eliminadoras de ar como a apresentada na Fig. 3.20b, que foram instaladas nos locais mais elevados do circuito hidráulico principal para eliminar ou minimizar a presença de bolhas no escoamento no interior do sistema e evitar os efeitos indesejados de leitura nas variáveis de interesse. O

último dos equipamentos que completa o circuito principal da bancada é o medidor de vazão mássica mostrado na Fig. 3.20c. Ele é composto 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 Controle de Fluidos Ltda. O conjunto consegue operar em uma faixa compreendida entre 0,0098 a 0,01686 kg/s, portanto, o instrumento de medição atinge os requerimentos para realizar os testes das condições nominais estabelecidas.

3.3.3. Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração tem como objetivo manter condições de operação removendo o calor recebido pelo nanofluidos na seção de testes por intermédio de um trocador de calor tube in tube que atua como evaporador no sistema de refrigeração. Assim, a Fig. 3.21 apresenta um modelo esquemático do sistema de refrigeração. O sistema de refrigeração é composto por quatro elementos principais: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão.

O fluido refrigerante utilizado é o R-438A, cuja compressão é realizada por intermédio de um compressor (modelo UR4A092IUAET fornecido pela ELGIN.). A tensão e a corrente também são medidas por intermédio das placas de aquisição de dados NI9242 e NI9246 respectivamente. Antes do compressor, encontra-se um trocador de calor do tipo tube in tube, denominado de evaporador, onde no interior do tubo circula o refrigerante, e no espaço anular escoam o nanofluido em contracorrente.

O condensador utiliza um trocador de calor placas paralelas. Por uma parte do condensador, a água escoa por intermédio de uma bomba hidráulica (modelo B-12 WEG, fornecida pela Thebe Bombas Hidráulicas) com rotação de 3500 RPM e vazão máxima de 7 m³/h. No entanto, a vazão é monitorada por um medidor de vazão roda d'água (da série SPX de efeito Hall fornecido por Contech) e é controlada pelo acionamento de uma válvula de controle com atuador proporcional (série LRB24-SR fornecida por BELIMO) instalada em paralelo com o trocador de calor que retira calor do fluido refrigerante com auxílio de uma torre de resfriamento. A expansão do gás é realizada por intermédio de uma válvula eletrônica de expansão (modelo E2V, fabricada pela Carel) que é controlada pelo driver EVD Evolutions Carel cujo grau de superaquecimento é ajustado com a abertura e fechamento da válvula. Após ser expandido, o R-438A segue novamente para o evaporador, completando assim o ciclo termodinâmico. Uma característica importante é que o sistema de refrigeração está completamente instrumentado, possibilitando o monitoramento e controle rápido no sistema total.

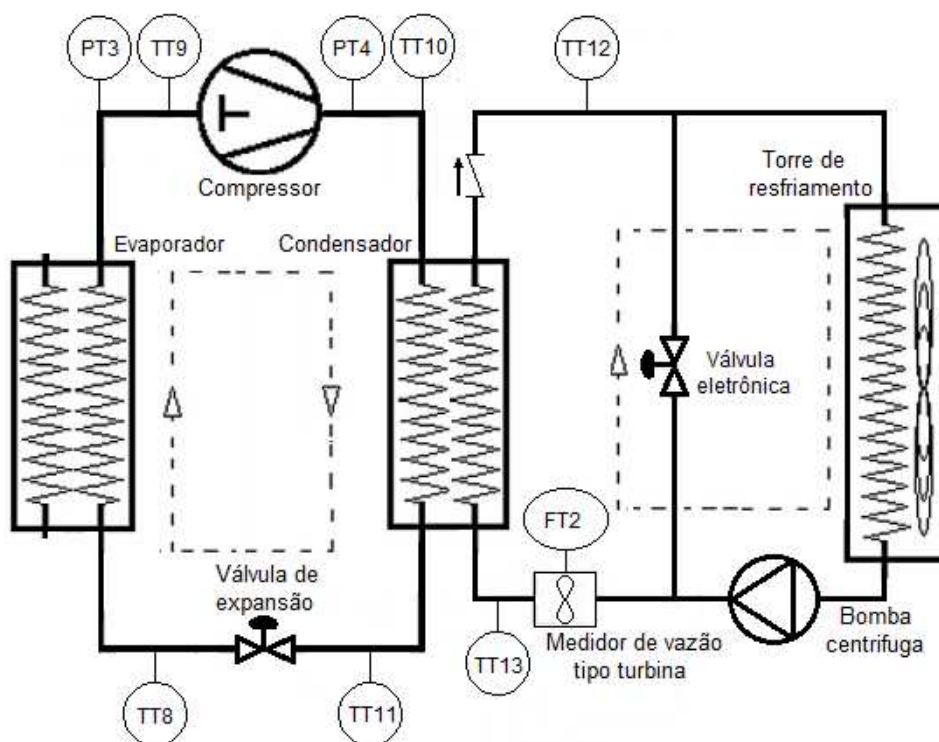


Figura 3.21 – Representação esquematizada do sistema de refrigeração

3.3.4. Sistema de pré-aquecimento

A figura 3.22 apresenta o diagrama esquemático do sistema de pré-aquecimento. Este sistema tem como finalidade controlar a temperatura do fluido na entrada na seção de testes. Logo após sair da seção de testes o fluido é resfriado e perde calor na seção de escoamento e medição da vazão mássica. Portanto, é necessário aquecê-lo novamente antes de entrar na seção de testes. Esta etapa é realizada no circuito de pré-aquecimento formado por um reservatório de água com volume de 100 L, uma bomba centrífuga (modelo ICS-50BV fornecido pela Eletroplas), e um trocador de calor casco tubo.

A bomba fornece uma vazão máxima de $2,1 \text{ m}^3/\text{h}$, tais condições são suficientes para a água escoar através do circuito. A água é aquecida por uma resistência elétrica de 3.5 kW cuja potência é manipulada por um conversor estático de potência (modelo TH6200A16 fornecido pela THERMA). Assim, com o conjunto resistência-controlador de potência foi possível projetar e implementar um controle PID de temperatura que age na temperatura de entrada da sessão de teste, possibilitando uma precisão de $\pm 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$ do valor-alvo de temperatura “setpoint”. Após sair do reservatório, a água transfere calor ao fluido testado por intermédio de um trocador casco tubo. No interior do tubo escoar o fluido de teste e no casco a água escoar em corrente oposta ao do fluido. O calor transferido é monitorado por

intermédio de 4 sensores de temperaturas PT100 instalados na entrada e na saída do trocador de calor de cada circuito.

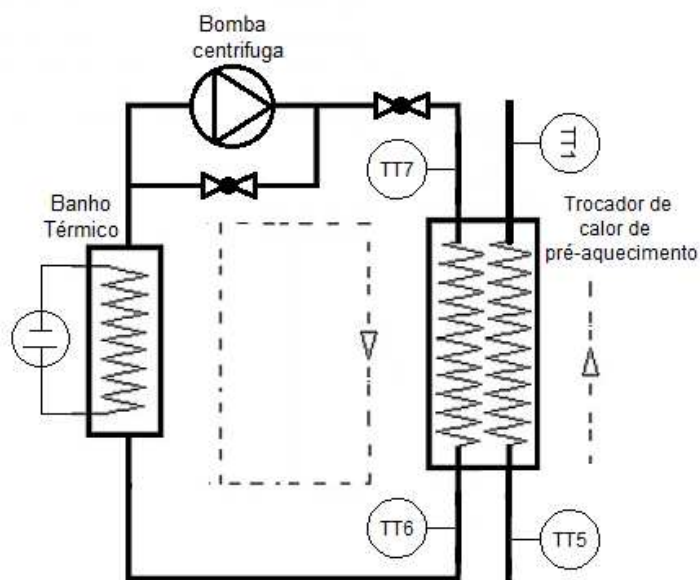


Figura 3.22 - Diagrama esquematizado da seção de pré-aquecimento.

3.3.5. Sistema de monitoramento e aquisição de dados

Para realizar o monitoramento e aquisição dos dados necessários na avaliação do desempenho termo-hidráulico, foi desenvolvida no software LabView® uma interface homem-máquina (Painel de controle) que permite a comunicação entre os equipamentos e o operador que está monitorando o processo. É por intermédio desta interface que as informações são recebidas dos instrumentos instalados na bancada experimental e realizada a manipulação das variáveis por intermédio dos atuadores. Deste modo, além de coletar os dados, o operador pode ajustar parâmetros para atingir as condições nominais estabelecidas dos testes e solucionar qualquer anomalia que pudesse apresentar-se durante a execução do experimento. Sendo assim, foi projetado e implementado na bancada experimental um sistema de monitoramento e aquisição de dados, fundamentado na norma de simbologia gráfica para visualização de processos (ISA-S5.5, 1986) (Graphic Symbols for Process Displays).

O sistema de monitoramento desenvolvido possui como característica fundamental a aquisição e armazenamento de informação proveniente das leituras dos instrumentos de medição instalados na bancada experimental, especialmente aqueles necessários para registrar a variáveis requeridas na avaliação do desempenho termo-hidráulico do nanofluido. No entanto, também permite manipular a potência na resistência do banho térmico e a frequência das bombas com acoplamento magnético e, assim, atingir as condições

estabelecidas para os testes. O painel de monitoramento e controle mostrado na Fig. 3.23 possui indicadores luminosos de alerta que são acionadas uma vez que a pressão de descarga ou a temperatura de descarga do compressor supera o limite estabelecido, ou quando a temperatura do fluido de teste após da saída do trocador de resfriamentos for menor que 3°C ou, ainda, quando a vazão mássica do sistema é inferior a 5 g/s.

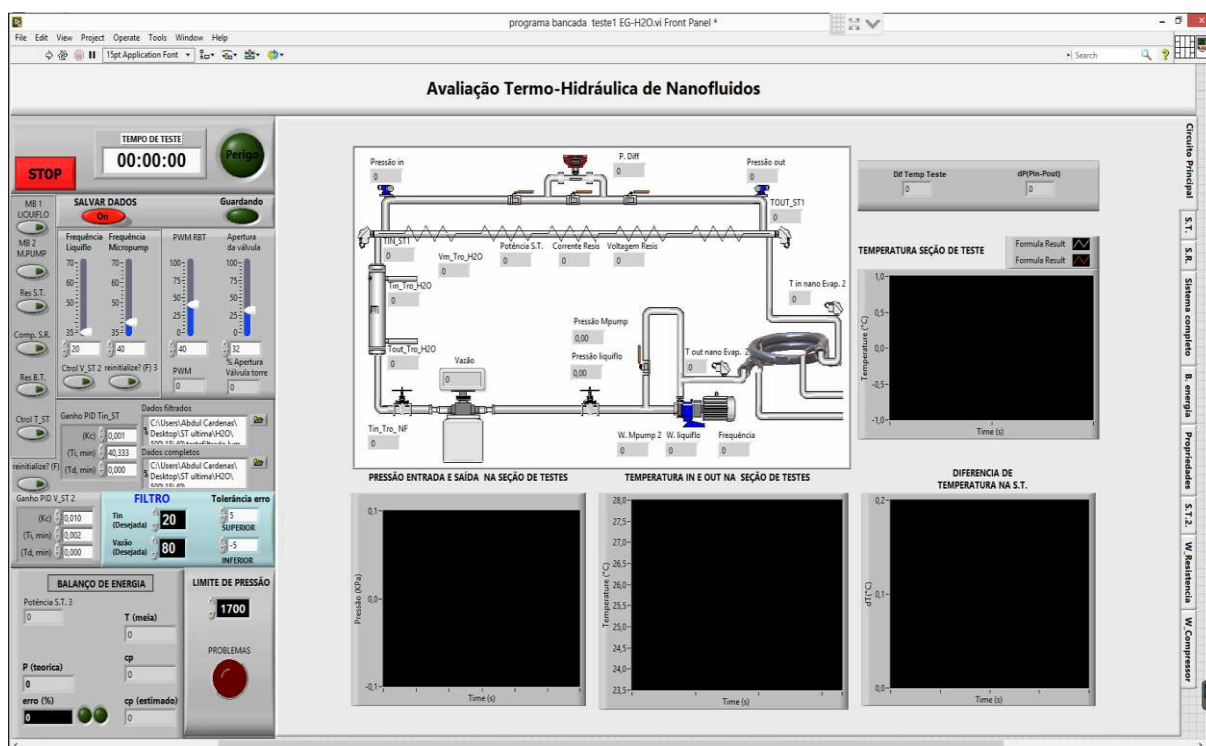


Figura 3.23 - Tela principal da interface gráfica em labView®.

O sistema de aquisição de dados é composto por um computador com software de programação LabView® e dois chassi 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 trabalhar simultaneamente com até 8 módulos de entrada ou saídas analógicas e digitais como pode ser observado na Fig. 3.24.



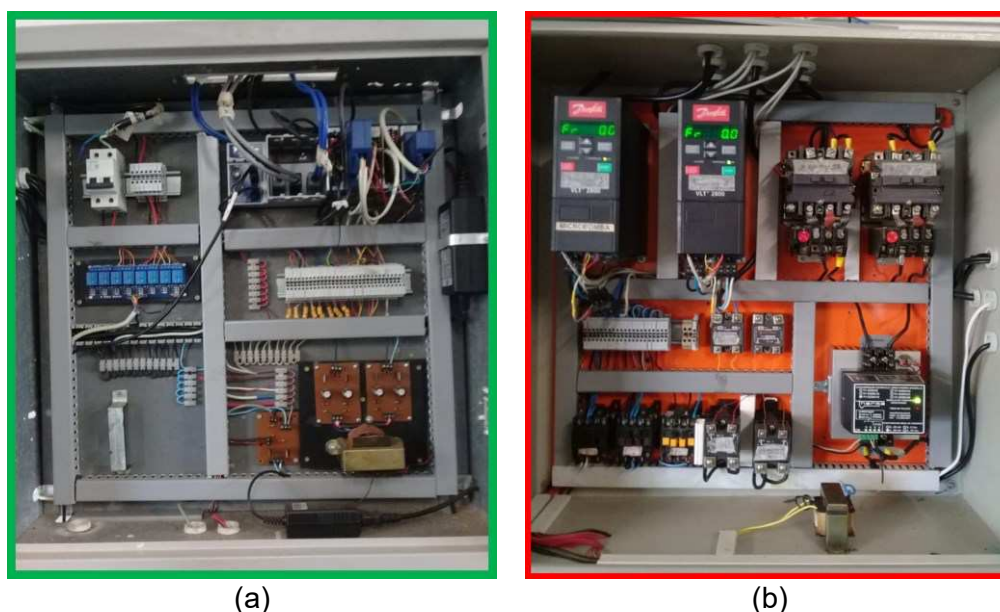
Figura 3.24 - Chassi NIcDAQ-9178 CompactDAQ USB utilizado no sistema de aquisição de dados.

A placa de aquisição NI cDAQ-9178 transfere ao PC os sinais elétricos condicionados pelos módulos de aquisição. O sistema registra uma leitura de dados a cada 5 segundo que são 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 são descritos na Tab. 3.8.

Tabela 3.8 - Módulos e instrumentos que compõem o sistema de monitoramento.

Modulo (E/S)	Número de canais	Instrumento	Seção	Grandeza	Variáveis
NI9214 (E)	16	Termopar	Seção de teste	Temperatura	T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8
NI9213 (E)	16	Termopar	Sistema de refrigeração	Temperatura	TT3, TT4 TT8, TT9, TT10, TT11 TT12 e TT13
NI9216 (E)	8	PT100	Seção de teste	Temperatura	T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14 e T15
NI9216 (E)	8	PT100	Seção de teste	Temperatura	TT1 e TT2
			Sistema de Pré-aquecimento	Temperatura	TT5, TT6 e TT7
		Medidor de vazão	Sistema de escoamento	Vazão mássica	FT1
		Transmissor de pressão	Sistema de refrigeração	Pressão manométrica	PT3 e PT4
NI9203 (E)	8		Seção de teste	Pressão manométrica	PT1 e PT2
		Transmissor de pressão diferencial	Seção de teste	Pressão diferencial	PDT
		Inversor de frequência	Sistema de escoamento	Potência Potência	PST1 PST2
NI9401 (E)	8	Medidor de vazão	Sistema de refrigeração	Vazão volumétrica	FT2
NI9242 (E)	3	Varivolt S.T.	Seção de teste	Tensão AC	VT1
		Compressor	Sistema de refrigeração	Tensão AC	VT2
NI9246 (E)	3	Varivolt S.T.	Seção de teste	Corrente AC	CT1
		Compressor	Sistema de refrigeração	Corrente AC	CT2
		Inversor de frequência	Sistema de escoamento	Frequência Frequência	SC1 SC2
NI9265 (S)	16	Controlador de potência	Sistema de Pré-aquecimento	Potência	PC1
		Válvula de controle	Sistema de refrigeração	Vazão volumétrica	FC1

Cabe descartar que a comunicação entre os instrumentos da bancada e o computador é realizada por intermédio de dois painéis elétricos, um de aquisição de dados, mostrado na Fig. 3.25a, e um painel de potência mostrando na Fig. 3.25b possibilitando assim a correto funcionamento do sistema de monitoramento.



(a) (b)
Figura 3.25 - Painéis elétricos. (a) Painel de aquisição de dados. (b) Painel de potência.

Como resultado de todos os parâmetros e condições necessárias para realização do presente trabalho, a Fig. 3.26 apresenta a bancada experimental na sua forma final. No APÊNDICE II, é apresentado o fluxograma de operação da bancada experimental.



Figura 3.26 - Equipamento experimental final.

3.4. Análise e validação da bancada experimental

Com o equipamento experimental construído e disponível para a realização dos testes, o passo seguinte foi implementar a metodologia para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção e o fator de atrito. No entanto, o procedimento experimental e a análise dos dados obtidos da bancada, foram inicialmente validados utilizando água destilada e mistura de água destilada etileno glicol ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) como fluidos de testes, já que existe na literatura informação consolidada que descreve seu comportamento termo-hidráulico. Em vista disso, os resultados médios obtidos para o coeficiente de transferência de calor dos fluidos de teste, foram comparados com modelos clássicos de transferência de calor para escoamento em regime laminar e turbulento. Da mesma forma, o resultado da queda de pressão foi comparado com equações habitualmente utilizadas para determinar este parâmetro de escoamento em regime laminar e turbulento. O propósito desta validação é garantir que o equipamento experimental possa realizar, coerentemente e corretamente, todas as medições inicialmente para os fluidos base e, posteriormente, para o nanofluido.

No primeiro teste realizado com água destilada, foi introduzido na bancada um volume de 2500 ml, sendo um volume satisfatório, considerando a quantidade de nanofluido requerido para a realização dos ensaios. O teste envolveu a variação de todos os parâmetros para determinar a faixa de operação de cada um deles. O objetivo principal era determinar uma rotina de operação para atingir as condições específicas de regime permanente de cada ensaio e, assim, replicar esta rotina para os testes, posteriormente, realizados com nanofluidos. A Tab. 3.9, descreve as condições nominais estabelecidas para a realização dos ensaios com água destilada.

Outros objetivos do teste podem ser destacados como: verificar a ausência de vazamentos, avaliar o funcionamento da bomba com acoplamento magnético, verificar a resposta do sistema de pré-aquecimento, analisar o correto funcionamento do sistema de aquisição e armazenamento de dados, verificar o funcionamento e as respostas do trocador da unidade de refrigeração, avaliar o correto funcionamento dos controladores de vazão mássica e da temperatura de entrada na seção de teste e por último verificar se todas as resistências elétricas responsáveis pelo fluxo de calor constante na parte do tubo da seção de testes estavam funcionando corretamente.

Tabela 3.9 - Condições para os testes com água destilada.

Fluido de teste preliminares	$T_{entrada}$ [°C]	$q''_{S.T.}$ [W/m ²]	\dot{m} [g/s]	Regime
Água destilada	15	≈10000	30	Turbulento
			40	Turbulento
			50	Turbulento
	25	≈18000	60	Turbulento
			70	Turbulento
			80	Turbulento
H ₂ O:EG 50:50 wt%	15	≈10000	20	Laminar
			25	Laminar
			65	Turbulento
	25	≈18000	70	Turbulento
			75	Turbulento
			80	Turbulento

3.4.1. Balaço de energia e isolamento da seção de testes

Com o objetivo 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 pelo fluxo de calor fornecido na seção de teste, $\dot{Q}_{P.E.}$, com o calor transferido para os fluidos de teste, resultante do cálculo do balanço de energia, $\dot{Q}_{B.E.}$, por intermédio da Eq. 3.4, utilizando os dados das medições realizadas. Assim, a porcentagem de erro do balaço de energia é calculada pela Eq. 3.4.

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

Onde, $\dot{Q}_{P.E.}$, variou entre 500 e 900 W como mostrado na Tab. 3.9. Desta maneira, o desvio médio apresentado para o balaço de energia em 48 testes realizados com os fluidos de teste foi inferior a $\pm 5\%$. Nessas condições, o isolamento térmico da seção de testes demonstrou ser apropriado para evitar perdas significativas de calor.

A Fig. 3.27, apresenta os resultados experimentais obtidos na bateria de ensaios realizados com água destilada e com a mistura de água e etileno glicol (H₂O:EG 50:50 wt%) para a validação do balanço de energia.

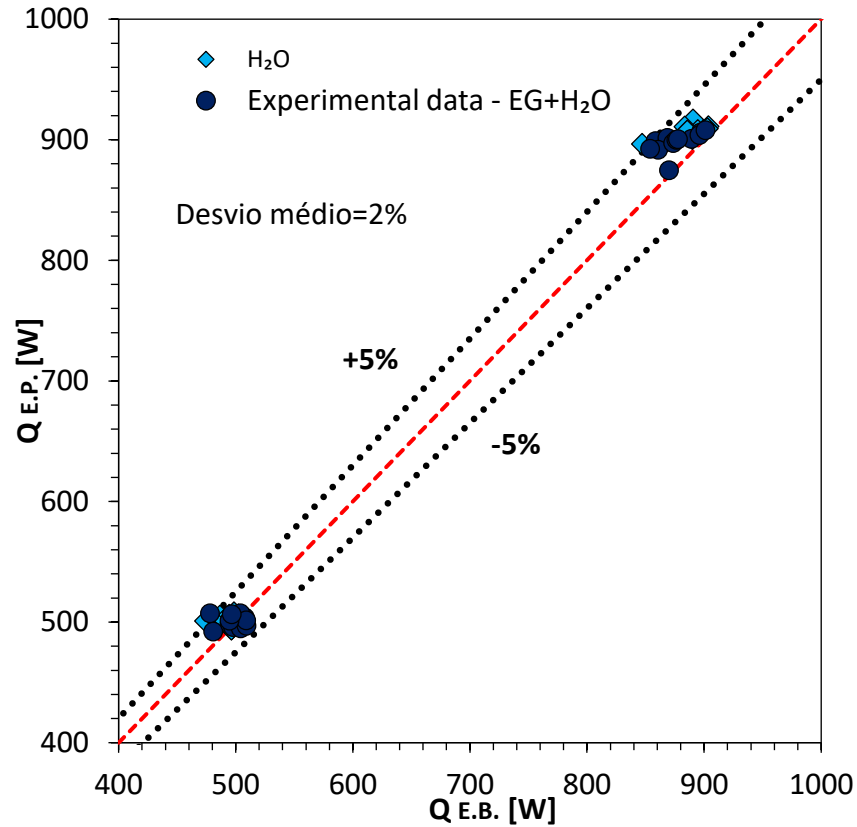


Figura 3.27 - Resultados experimentais para água destilada relacionando a potência elétrica, $\dot{Q}_{P.E.}$, com a potência calculada pelo balanço de energia, $\dot{Q}_{B.E.}$.

3.4.2. Queda de pressão e fator de atrito

Como mencionado anteriormente, a medição da queda de pressão foi realizada, pela diferença das medições de dois transmissores de pressão, posicionados na entrada e na saída da seção de teste. Entretanto, as medidas foram aferidas com os valores fornecidos pelo transdutor diferencial. É importante evidenciar que, as medições necessárias para determinar o comportamento fluidodinâmico foram adquiridas simultaneamente com os testes térmicos. Portanto, os resultados experimentais do fator de atrito foram obtidos por intermédio da queda de pressão na seção de testes como descrito pela Eq. 3.5.

$$f_{\text{exp}} = \frac{\pi^2 \cdot D^5 \cdot \rho \cdot \Delta P_{\text{exp}}}{8 \dot{m}^2 L} \quad (3.5)$$

Assim, o fator de atrito foi avaliado dos resultados de 24 testes realizados para a mistura água e etileno glicol, escoando no interior do tubo da seção de teste em regime laminar

($900 < Re < 2000$) e turbulento ($3000 < Re < 5500$), e de 24 testes para água destilada em regime turbulento ($5000 < Re < 13000$). A validação é baseada na comparação dos resultados com duas correlações, normalmente utilizadas para determinar este parâmetro em escoamento em regime laminar e turbulento. Os resultados experimentais para o fator de atrito dos fluidos de teste, foram comparados com o modelo analítico para regime laminar descrito na Eq. 3.6, onde o escoamento está completamente desenvolvido hidrodinamicamente com perfil de velocidade parabólico, também conhecido como a distribuição de Hagen-Poiseuille. Os resultados também foram comparados em regime turbulento com o modelo de Petukhov (1970) descrito pela Eq. 3.7, e com a correlação de Blasius, descrita pela Eq. 3.8.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.6)$$

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

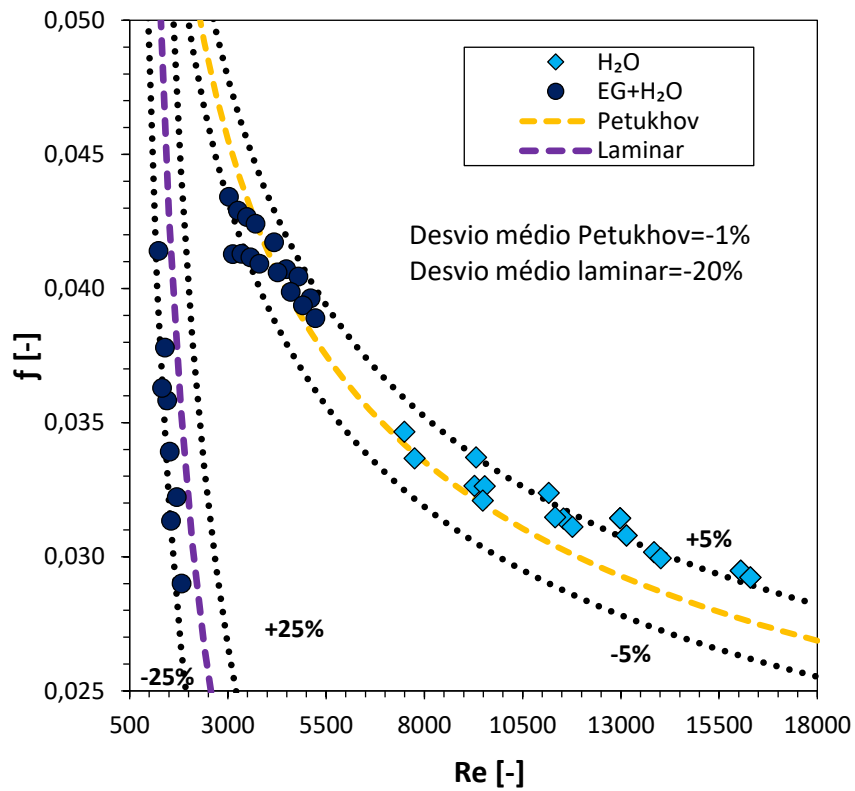
$$f = (0,79 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (3.7)$$

Para uma faixa de aplicação de, $10^4 \leq Re \leq 5 \times 10^6$

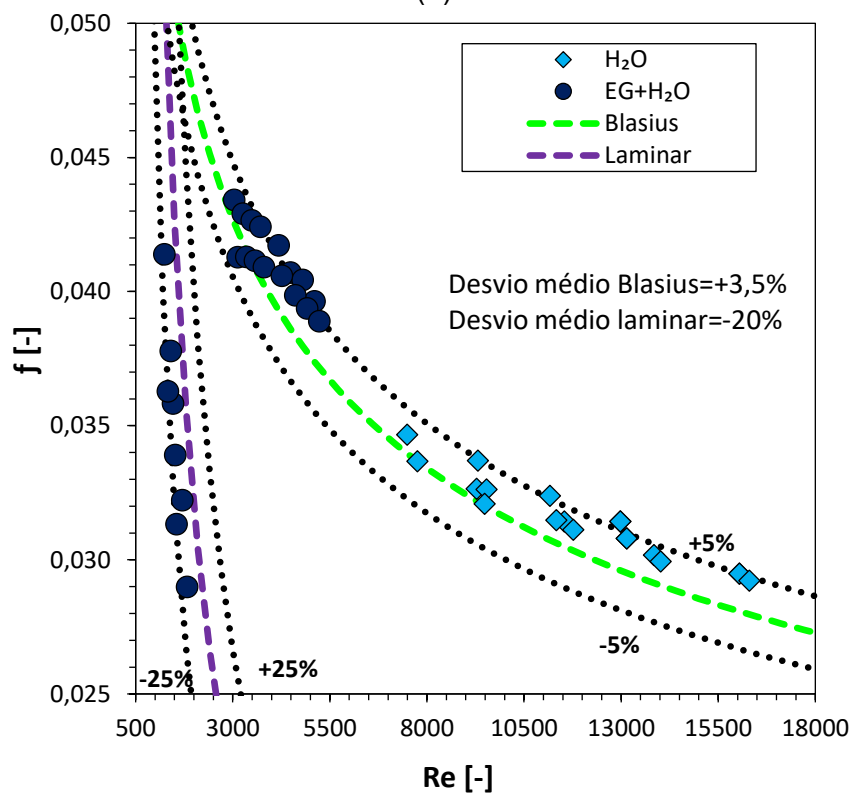
$$f = 0,316 Re^{-1/4} \quad (3.8)$$

Para uma faixa de aplicação de, $Re \leq 10^5$

Portanto, pode ser observado na Fig. 3.28 os resultados experimentais para o fator de atrito dos fluidos de teste comparado com os modelos descritos nas Eqs. 3.7, 3.8 e 3.9. Assim, o desvio médio obtido em regime laminar foi de -20%. Em regime turbulento a comparação entre os resultados experimentais e o modelo de Petukhov apresentou um desvio médio de -1%, como pode ser observado na Fig. 3.28a, e, quando comparados com o modelo de Blasius apresentou um desvio médio de 3,5%, como pode ser observado na Fig. 3.28b. Portanto, pode ser observado que os resultados das características de escoamentos e o comportamento fluidodinâmico dos dois fluidos de referência utilizados na bancada experimental apresentaram uma boa concordância quando comparados com os dois modelos utilizados para validar o equipamento experimental.



(a)



(b)

Figura 3.28 - Resultados obtidos do fator de atrito em função do número de Reynolds. (a) Comparação modelo de Petukhov (1970). (b) Comparação modelo de Blasius.

3.4.3. 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 superfície definida de fluxo de calor constante é independente da direção x . Assim a Figs. 3.29a e 3.29b, apresentam 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.

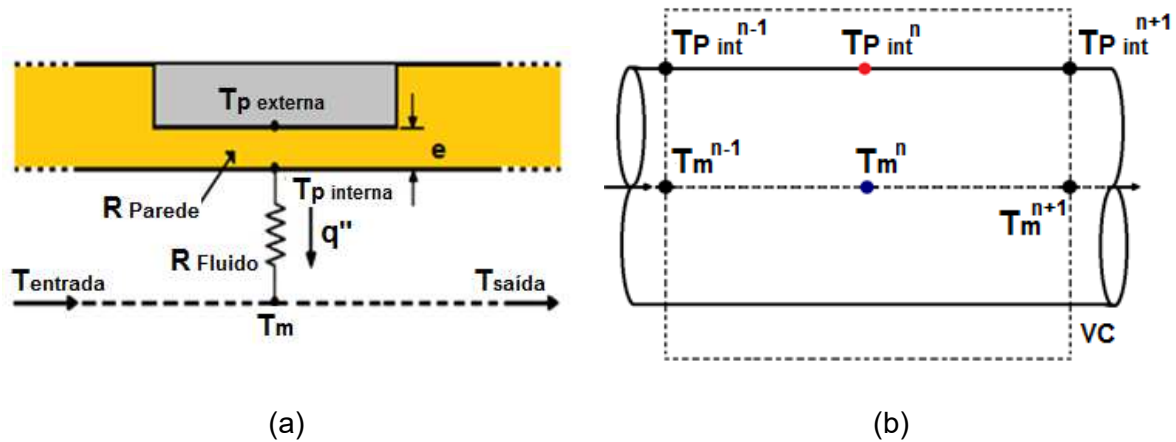


Figura 3.29 - Diagramas esquematizados. (a) Resistência térmica na seção de testes. (b) Volume de controle em torno da temperatura média do fluido

Assim, o coeficiente local de transferência de calor, $h(x)$, é dado pela Eq. 3.9, onde o fluxo de calor, q'' , é obtido pela razão entre a potência elétrica aplicada nas resistências, $\dot{Q}_{P.E.} = V \cdot I$, e a área superficial interna do tubo da seção de testes, $A_s = \pi DL$, descrito pela Eq. 3.10.

$$h(x) = \frac{q''}{T_p(x) - T_m(x)} \quad (3.9)$$

$$q'' = \frac{i \cdot (-T_{m,e})}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.10)$$

Como apresentado na Tab. 3.3, que descreve os dois valores de potência elétrica aplicados às resistências elétricas, consequentemente, o fluxo constante de calor resultante calculado pela Eq. 3.10, foi de 10, e 18 kW/m², respectivamente.

Para obter o coeficiente local de transferência de calor por convecção foram inicialmente determinadas a temperatura média do fluido em função da direção x , ao longo do tubo. A Fig.

3.29b, ilustra o volume de controle em torno da temperatura média do fluido e, aplicando o princípio básico de conservação de energia, tem-se que:

$$q_{conv} = q'' \cdot (P \cdot dx) = \dot{m} c_p (T_m - T_{m+dx}) \quad (3.11)$$

Onde $P = \pi \cdot D$.

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q'' \cdot \pi \cdot D}{\dot{m} c_p} \quad (3.12)$$

Integrando os dois lados da equação a partir de $x = 0$

$$\int dT_m = \int \frac{q'' \cdot \pi \cdot D}{\dot{m} c_p} dx \quad (3.13)$$

$$T_m(x) = T_{entrada} + \frac{q'' \cdot \pi \cdot D x}{\dot{m} c_p} \quad (3.14)$$

A temperatura local da superfície interna, $Tp_{int}(x)$, foi determinada a partir da medição realizada pelos 8 termopares e os 8 PT100, localizados na superfície externa, $Tp_{ext}(x)$, aplicando o conceito de resistência térmica que modela o processo difusivo do calor transferido pela parede do tubo, que é descrito pela Eq. 3.15.

$$Tp_{int}(x) = Tp_{ext}(x) - \dot{q} R_{parede} \quad (3.15)$$

Onde a resistência da parede do tubo, R_{parede} , é dada pela Eq. 3.16

$$R_{parede} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2\pi \cdot L \cdot k_{latão}} \quad (3.16)$$

A condutividade térmica do latão foi determinada através de um polinômio obtido dos dados de condutividade em função da temperatura, fornecidos pelo software ESS (*Engineering Equation Solver*).

Para obter, finalmente, o valor médio do coeficiente de transferência de calor por convecção, (ver Eq. 3.17), foi realizada uma média dos valores calculados do coeficiente local, $h(x)$, ao longo do tubo para os diferentes pontos de medição.

$$h_{médio} = \frac{h(x_1) + \dots + h(x_n)}{n} \quad (3.17)$$

Portanto, o número de Nusselt pode ser calculado pela Eq. 3.18.

$$Nu_{médio} = \frac{h_{médio} \cdot D}{k} \quad (3.18)$$

Sendo, k , a condutividade térmica do fluido de trabalho, onde a temperatura de referência adotada para definir esta propriedade foi a média da temperatura na entrada e saída da seção de teste, $T_{ref} = (T_{ent} + T_{sai})/2$. Para a água destilada a condutividade térmica foi também determinada, por intermédio de um polinômio obtido dos dados de condutividade em função da temperatura, fornecidos pelo software ESS.

Os valores médios do número de Reynolds e do número de Prandtl, foram calculados com as Eqs. 3.19 e 3.20, respectivamente, onde as propriedades físicas como viscosidade, μ , e o calor específico, c_p , foram determinadas a partir da temperatura de referência, mencionadas anteriormente.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (3.19)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.20)$$

A validação da transferência de calor por convecção em escoamento plenamente desenvolvido em regime turbulento da bancada, consistiu em comparar todos os dados experimentais que resultaram da análise dos 48 testes realizados para os fluidos de teste, com resultados teóricos obtidos dos modelos de (SIEDER e TATE, 1936), apresentado pela Eq. 3.21 que opera em regime laminar e o modelo de Gnielinski (1975) dado pela Eq. 3.22, que é aplicado em regime turbulento dentro da faixa nas quais foram realizados os testes.

$$Nu = 1,86 \cdot \left[\left(\frac{D}{L} \right) \cdot Re_D \cdot Pr \right]^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (3.21)$$

Para uma faixa de aplicação de, $0,48 \leq Pr \leq 16700$, $(D/L) \cdot Pr \cdot Re \geq 10$, e $0,0044 \leq (\mu/\mu_s) \leq 9,75$.

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.22)$$

Para uma faixa de aplicação de, $0,5 \leq Pr \leq 2000$, e $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$, onde o fator de atrito é determinado pelo modelo de Petukhov (1970), descrito pela Eq. 3.7.

Assim, a Fig. 3.30, apresenta uma comparação entre os resultados dos testes preliminares, realizados com a mistura de água e etileno glicol para validar o coeficiente da

transferência de calor no equipamento experimental com o modelo de (SIDER e TATE, 1936).

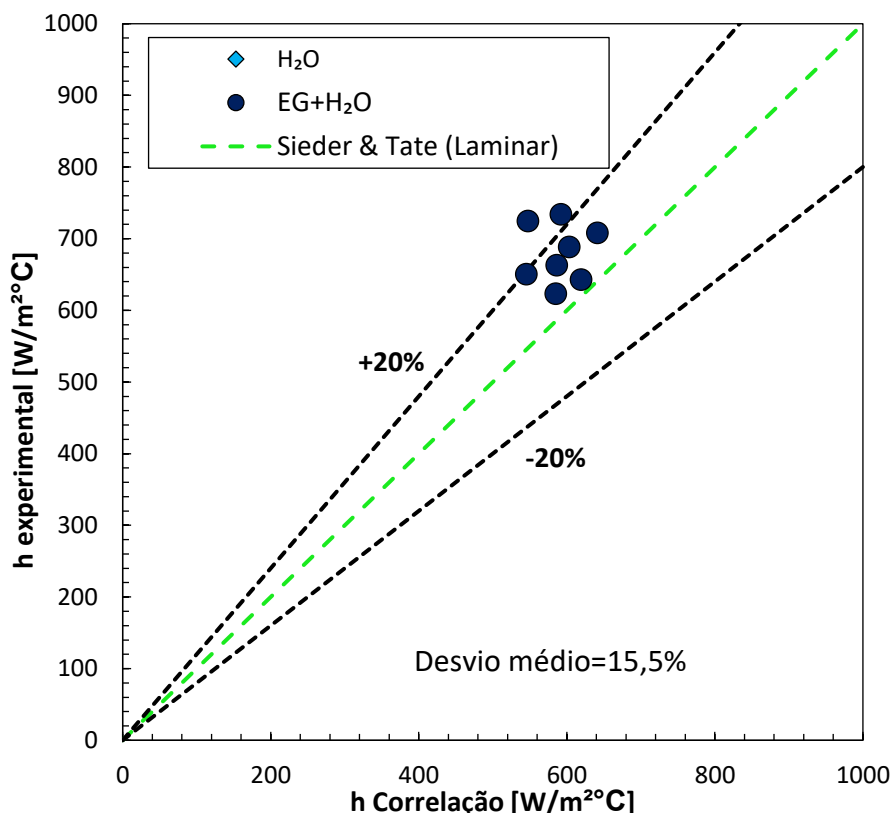


Figura 3.30 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de (SIDER e TATE, 1936).

Como pode ser observado na Fig. 3.30, os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a mistura de água e etileno glicol (H₂O:EG 50:50 wt%), estão majoritariamente dentro da margem de erro de $\pm 20\%$, apresentando um desvio máximo de 25% e um desvio médio de 15,5% em relação com o modelo teórico.

Por outro lado, a Fig. 3.31, apresenta a comparação dos resultados experimentais, com o modelo proposto por Gnielinski (1975), onde pode ser verificado que todos os pontos experimentais referentes aos 48 testes realizados para água destilada e a mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%), encontraram-se dentro da margem de erro de $\pm 10\%$, apresentando um desvio máximo de 11% e um desvio médio de 4% em relação com o modelo teórico. Demonstrando, finalmente, que existe uma boa concordância entre os resultados da validação do coeficiente de transferência de calor por convecção no equipamento experimental e os modelos utilizados para prever o coeficiente de transferência de calor para escoamento monofásico em regime turbulento no interior de tubos.

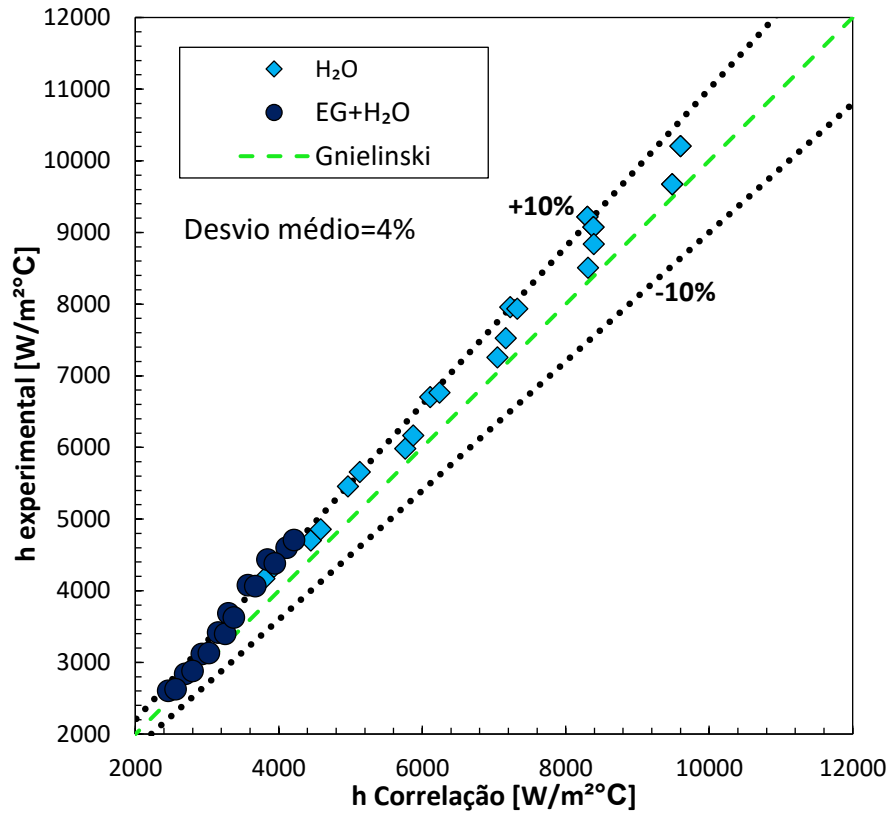


Figura 3.31 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente versus correlação de Gnielinski (1975).

3.5. Análise de incertezas

A avaliação da incerteza dos parâmetros secundários foi determinada diretamente pelo software ESS, que fundamenta seus cálculos no método proposto por Kline e McClintock, apud (MOFFAT, 1988), segundo o qual, se y , for um parâmetro secundário dependente de parâmetros primários obtidos através de medições independentes, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, temos que,

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.23)$$

Sendo,

$$y = y_m \pm \delta y \quad (3.24)$$

e, se cada um dos parâmetros x_i , for escrita como:

$$x_i = x_{mi} \pm \delta x_i \quad (3.25)$$

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

$$\delta y = \sqrt{[(Sx_1)(\delta x_1)]^2 + [(Sx_2)(\delta x_2)]^2 + [(Sx_3)(\delta x_3)]^2 + \dots + [(Sx_n)(\delta x_n)]^2} \quad (3.26)$$

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

$$Sx_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (3.27)$$

Assim, as incertezas das variáveis medidas e a propagação de incerteza para variáveis calculadas são apresentadas nas Tabs. 3.10 e 3.11. É importante ressaltar que o intervalo de confiança adotado para as incertezas nas variáveis independentes foi de 95%.

Tabela 3.10 - Incertezas dos parâmetros primários ou variáveis medidas pelos instrumentos.

Parâmetro	Instrumento	Faixa de medição	Incerteza
$T_p(n)$	Termopar tipo T	-200 a 350 °C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
T_{ent} e T_{sai}	PT100	-200 a 500 °C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
P_{ent} e P_{sai}	Transmissor de pressão	0 a 100kPa	$\pm 0,66\text{kPa}$
ΔP	Transmissor de pressão diferencial	0 a 100kPa	$\pm 0,25\%$
\dot{m}	Medidor de vazão tipo coriolis	0,0098 a 0,01686 kg/s	$\pm 0,15\%$
I	NI9242	0 a 40A	$\pm 0,01\text{A}$
V	NI9246	0 a 320V	$\pm 0,01\text{V}$
m	Balança BK-500	0,01 a 510g	$\pm 0,001\text{g}$
L, x	Trena	0 a 5m	$\pm 0,5\text{mm}$
D	Paquímetro	0 a 15cm	$\pm 0,01\text{mm}$
$\dot{W}_{m.b.}$	Saída analógica do inv. de frequência VLT2800	0 a 0,37kW	$\pm 1,5\%$

Tabela 3.11 - Incertezas de parâmetros secundários ou variáveis calculadas dependente das medições

Parâmetro	Incerteza
$\dot{Q}_{P.E.}$	$\pm 1,15\%$
$\dot{Q}_{B.E.}$	$\pm 3,1\%$
q''	$\pm 1,38\%$
\dot{W}_B	$\pm 0,4\%$
$T_m(x)$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
Re	$\pm 0,21\%$
f	$\pm 1,01\%$
h_m	$\pm 5,1\%$
Nu_m	$\pm 5,5\%$

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.2. Propriedades termofísicas no nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%)

4.2.1. *Massa específica*

Uma vez que é admitida uma boa dispersão das nanopartículas no fluido de base, assumindo uma concentração volumétrica constante e uniforme, além de determinar previamente as propriedades físicas do fluido de base, a massa específica do nanofluidos produzidos também foi obtida com o auxílio do viscosímetro fabricado pelo Anton Paar (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000) que pode ser visto na Fig. 3.11.

Assim, na Fig. 4.1 são apresentados os resultados experimentais da massa específica de todas as amostras de nanofluido produzidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), cujas concentrações volumétricas são aquelas descritas pela Tab. 3.2. Os resultados foram comparados com a massa específica do fluido base em função da temperatura.

Pode ser observado pela Fig. 4.1, que a massa específica de todos os fluidos apresentou uma diminuição em função do incremento da temperatura do fluido. Como era de se esperar, é possível observar que a massa específica de todas as amostras de nanofluido apresentou incrementos com a adição de nanopartículas.

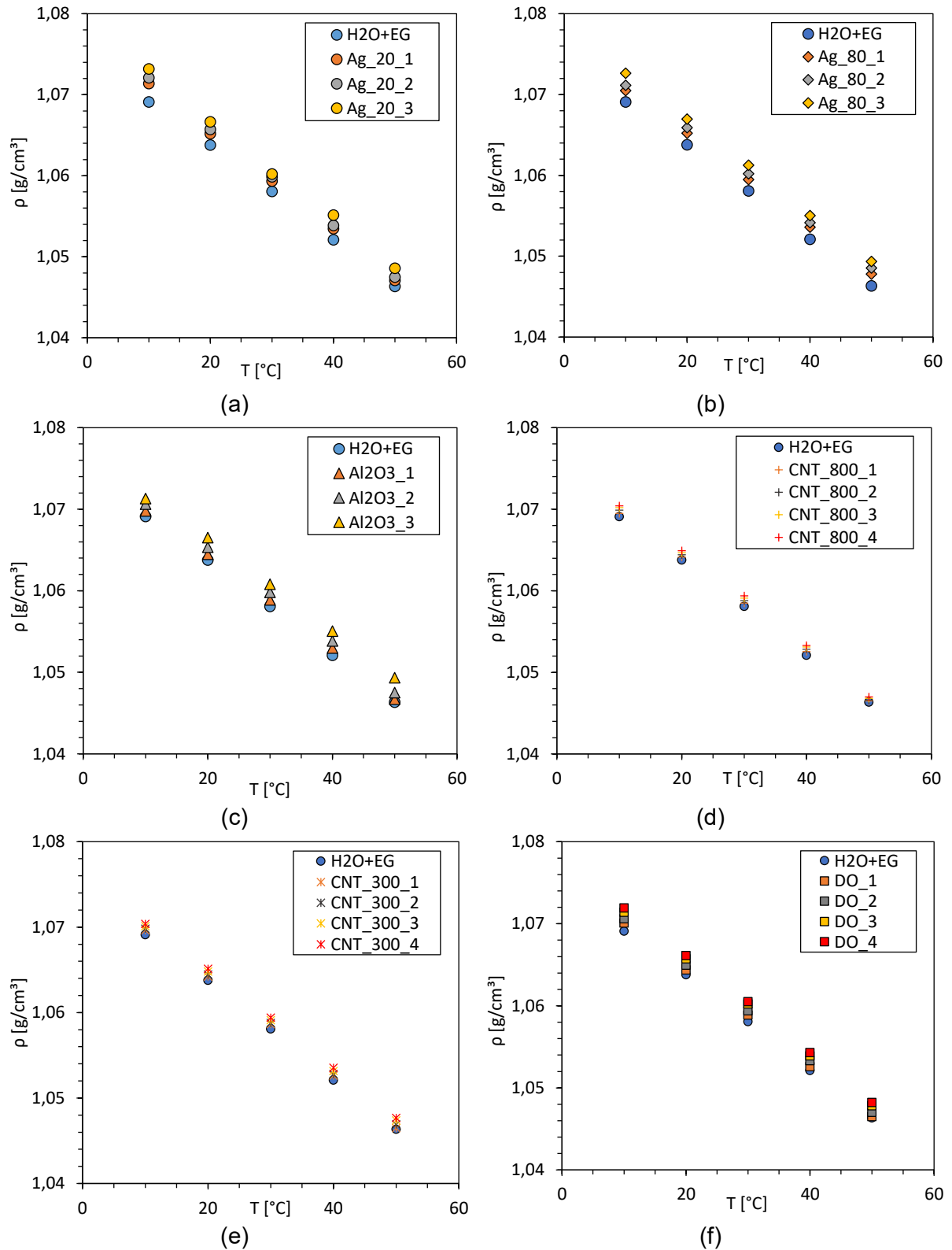


Figura 4.1 - Massa específica dos nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Prata com diâmetro de 20 nm. (b) Prata com diâmetro de 80 nm. (c) Alumina com diâmetro de 40-80 nm. (d) Nanotubo de carbono com $r=800$. (e) Nanotubo de carbono com $r=300$. (f) Diamante com diâmetro de 3-6 nm.

Na Fig. 4.2 pode ser observada a comparação dos incrementos relativos da massa específica obtidos experimentalmente de todas as amostras de nanofluido a 20 °C, com os resultados obtidos dos incrementos da massa específica utilizando o modelo da regra da mistura descrito pela Eq. 2.2, que foi inicialmente aplicado por (PAK e CHO, 1998) e é usualmente utilizado para determinar a massa específica dos nanofluidos. Nesse sentido, adotando como parâmetro de comparação os resultados obtidos das medições realizadas a 20 °C, a Tab. 4.1 apresenta os desvios apresentados entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura.

Tabela 4.1 - Comparação dos valores massa específica entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura para todas as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%)

Amostra	Φ [%]	ρ [g/cm^3]		Desvio [%]
		Exp. [$\pm 0,0006$]	Modelo Eq. 2.2	
(H ₂ O:EG 50:50 wt%)	[-]	1,0638	1,065	-0,11
Ag ₂₀	0,005	1,0652	1,0655	-0,03
	0,01	1,0657	1,0659	-0,02
	0,05	1,0667	1,0697	-0,29
Ag ₈₀	0,005	1,0652	1,0655	-0,03
	0,01	1,0659	1,0659	-0,00
	0,05	1,0670	1,0697	-0,23
Al ₂ O ₃	0,005	1,0645	1,0639	0,05
	0,01	1,0653	1,0640	0,12
	0,05	1,0665	1,0651	0,13
CNT ₈₀₀	0,001	1,0641	1,0650	-0,08
	0,005	1,0644	1,0651	-0,06
	0,01	1,0647	1,0651	-0,04
	0,05	1,0649	1,0655	-0,06
CNT ₃₀₀	0,001	1,0642	1,0650	-0,07
	0,005	1,0645	1,0651	-0,06
	0,01	1,0648	1,0651	-0,03
	0,05	1,0651	1,0655	-0,04
DO	0,001	1,0644	1,0650	-0,06
	0,005	1,0650	1,0651	-0,02
	0,01	1,0657	1,0652	0,04
	0,05	1,0661	1,0662	-0,01

Portanto, a Tab. 4.1 pode ser observado que quando comparados os resultados experimentais com os resultados obtidos como o modelo da regra da mistura o desvio máximo e o desvio médio obtidos foram de -0,29% e -0,04%, verificando assim a boa concordância do modelo para estimar a massa específica dos nanofluidos a base de (H₂O:EG 50:50 wt%).

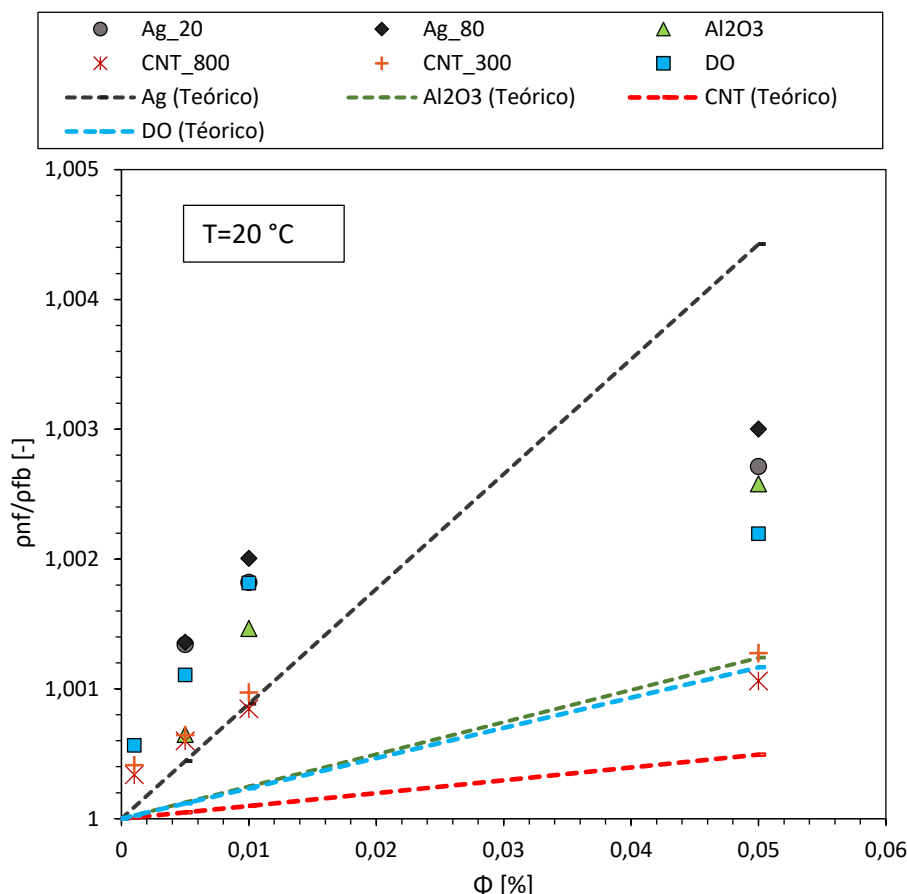


Figura 4.2 – Massa específica relativa dos nanofluidos a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da concentração volumétrica.

No entanto, é importante enfatizar que, devido às baixas concentrações em volume de nanopartícula, os resultados das massas específicas obtidos pelo modelo da regra da mistura e das medições experimentais são fortemente influenciados pela massa específica do fluido base. Em consequência, na Fig. 4.2 pode ser observado que o máximo incremento relativo da massa específica das amostras de nanofluido em função da concentração utilizando o modelo da regra da mistura foi de 0,44%, e o máximo incrementos relativo obtido das medições experimentais foi 0,30%, ambos os incrementos referentes à amostra de nanofluido de prata com a maior concentração em volume de nanopartícula (Ag_80_3). Este comportamento era esperado, dado que, as nanopartículas de prata (Ag) são as que possuem a maior massa específica dos diferentes tipos de nanopartículas utilizadas. Por outro lado, pode ser observado na Fig. 4.2 que as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono

(CNT_800 e CNT_300) apresentaram os menores incrementos relativos da massa específica, isto devido que, as nanopartículas de nanotubo de carbono são as de menor massa específica entre os diferentes tipos de nanopartículas utilizadas na produção de nanofluido. Portanto, na Fig. 4.2 pode ser verificada a influência da concentração e da massa específica da nanopartícula na determinação da massa específica dos nanofluidos.

4.2.2. Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido, $c_{p,nf}$, foi determinado, empregando um modelo clássico baseado no equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante dado pela Eq. 2.5, que considera a concentração volumétrica das nanopartículas, ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão, $(\rho c_p)_{fb}$ e $(\rho c_p)_{np}$. Assim, na Fig. 4.3 são apresentados os valores do calor específico de todas as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), cujas concentrações volumétricas são aquelas descritas pela Tab. 3.2. Os resultados foram comparados com calor específico do fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da temperatura.

Como seria de esperar, na Fig. 4.5 pode ser verificado que o calor específico das amostras de nanofluido apresentaram uma diminuição com o incremento da concentração de nanopartícula. Este comportamento é devido ao calor específico das nanopartículas, que é menor em comparação com o calor específico do líquido base; assim, é evidente que o calor específico resultado de uma mistura diminuirá em função do aumento da concentração volumétrica da nanopartícula, como descrito por (MURSHED, 2011).

É importante enfatizar que o modelo matemático utilizado para determinar o calor específico das amostras de nanofluidos não considera a morfologia ou o tamanho da nanopartícula. Nesse sentido, na Fig. 4.3 não foi necessário apresentar os valores do calor específico dos nanofluidos de prata das duas configurações de tamanho (Ag_20 e Ag_80) nem os valores do calor específico dos nanofluidos de nanotubo de carbono das duas configurações geométricas (CNT_800 e CNT_300), já que seriam os mesmos em ambos os casos utilizando os resultados obtidos por intermédio do modelo descrito na Eq. 2.5. A possível influência da morfologia ou do tamanho já foi analisada por (MURSHED, 2011), ele realizou medições experimentais do calor específico em nanofluidos de óxido de titânio (TiO₂) a base etileno glicol com nanopartículas de diferente tamanho e morfologia (nanopartículas esféricas e cilíndricas), evidenciando que os resultados obtidos apresentaram valores quase idênticos de calor específico, e demonstraram também que existe uma boa concordância com os valores obtidos pelo modelo teórico da Eq. 2.5. A boa concordância entre os resultados do

calor específico de nanofluidos obtidos com o modelo do equilíbrio térmico descrito pela Eq. 2.5 e os resultados experimentais também foi afirmada por autores como Wang, *et al.* (2010), O'Hanley, *et al.* (2012) e Chadha e Srivastava (2017). No entanto, Chadha e Srivastava (2017) também afirmam que a adição do efeito da camada interfacial aprimora a boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos como o modelo teórico.

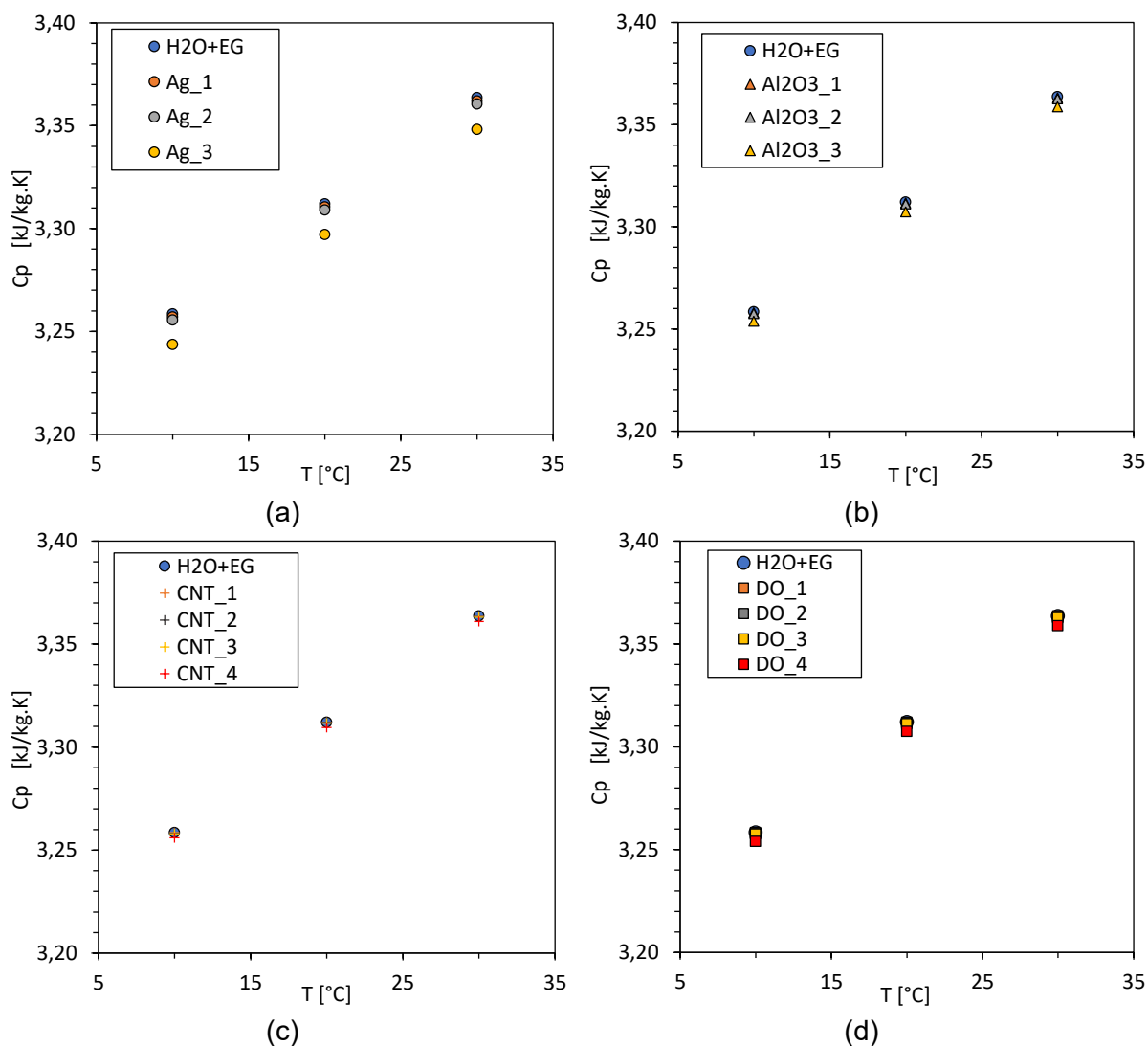
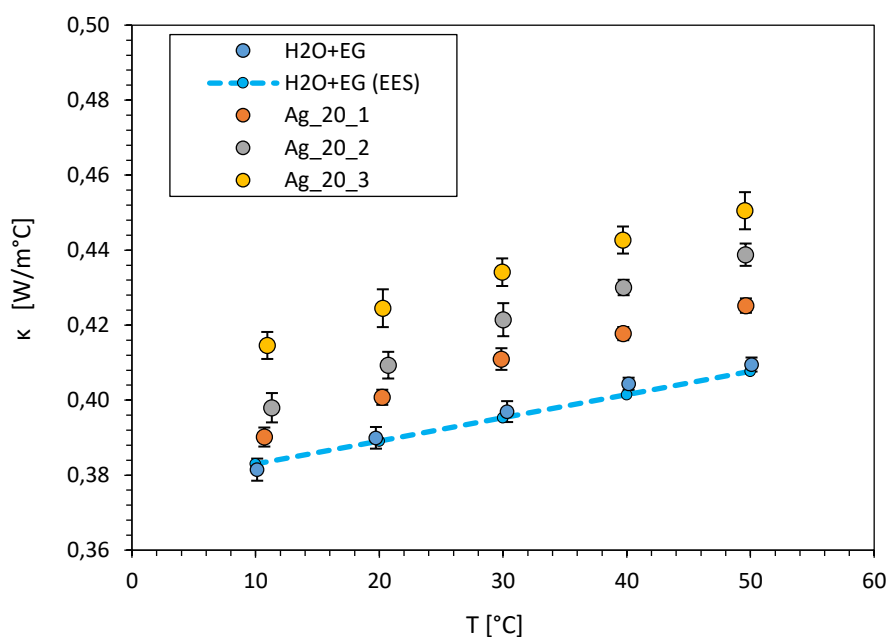


Figura 4.3 - Calor específico dos nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Prata. (c) Alumina. (d) Nanotubo de carbono. (f) Diamante.

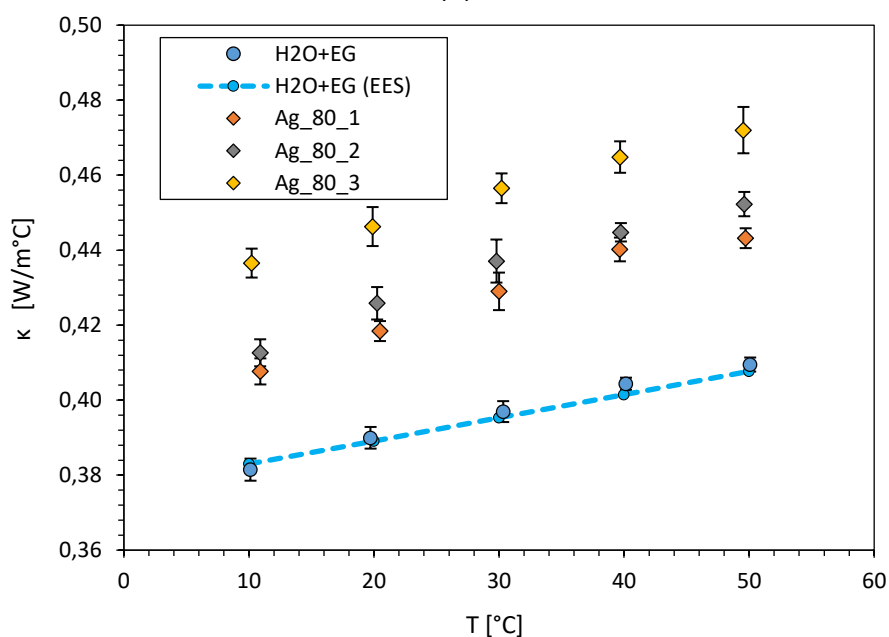
4.2.3. Condutividade térmica

A seguir são apresentados os resultados experimentais das medições realizadas da condutividade térmica das amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%). Assim, a Fig. 4.4, ilustra os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras

de nanofluidos de prata (Ag) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições.



(a)



(b)

Figura 4.4 - Condutividade térmica dos nanofluidos de prata em função da variação da temperatura do fluido. (a) Ag com diâmetro de 20 nm. (b) Ag com diâmetro de 80 nm

Primeiramente, na Fig. 4.4 é importante salientar a boa concordância entre os dados experimentais da condutividade térmica do fluido base ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) e os dados de referência obtidos por intermédio da base de dados do software EES, os quais apresentaram um desvio máximo de 0,63% dentro da faixa de temperatura analisada. Nas Figs. 4.4a e 4.4b pode ser observado que a condutividade dos nanofluidos aumentou com o aumento da

concentração volumétrica das nanopartículas. Assim, na Fig. 4.4a os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 20 nm foram em média 3,2%, 5,8% e 9,3% para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente. Na Fig. 4.4b os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 80 nm foram em média 7,8%, 9,6% e 14.8% para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente.

Pode ser observado um efeito do tamanho das nanopartículas, já que os incrementos para as amostras de nanofluidos de prata com nanopartículas de diâmetro de 80nm foram superiores aos incrementos obtidos as amostras de nanofluidos de prata com nanopartículas de diâmetro de 20nm. Este comportamento é divergente com a afirmação de (MUNYALO e ZHANG, 2018), onde a partir de uma extensa revisão bibliográfica conclui que, geralmente, a condutividade térmica dos nanofluidos aumenta à medida que o tamanho das nanopartículas diminui. No entanto, (WARRIER e TEJA, 2011) produziram nanofluidos de prata com concentração volumétrica de 0,3% em etilenoglicol como base fluido utilizando nanopartículas com diâmetros de 20, 30, 50 e 80 nm que também foram fornecidas pela Nanostructures & Amorphous Material. Eles observaram que os incrementos de condutividade diminuía quando o tamanho da nanopartícula diminuía. Isto verifica a tendência obtida nos dados experimentais da condutividade térmica dos nanofluidos de prata (Ag) do presente trabalho.

A influência da temperatura no incremento da condutividade térmica do nanofluidos também pode ser discutida observando as Figs 4.4a e 4.4b, onde foi visível que os nanofluidos de prata apresentaram uma tendência de aumento no incremento da condutividade térmica com o aumento da temperatura. Este comportamento também foi observado por Wen e Ding (2004) e (DING, ALIAS, *et al.*, 2006). Os dois trabalhos mostraram que os incrementos relativos da condutividade térmica em nanofluidos de nanotubo de carbono a base água aumentaram linearmente com o aumento da temperatura. Segundo (LI, QU e FENG, 2008) a intensificação dos incrementos da condutividade térmica em nanofluidos pode ser correlacionada ao efeito do aumento da temperatura do nanofluido, já que a temperaturas elevadas é favorecida a redução da energia superficial da partícula, diminuindo a possibilidade aglomeração das nanopartículas e causando uma diminuição da viscosidade e em consequência fazer que o movimento browniano ou os movimentos estocásticos das partículas sejam intensificados.

A Fig. 4.5, ilustra os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluidos de alumina (Al_2O_3) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições. Na Fig. 4.5 pode ser observado que a condutividade

dos nanofluidos de alumina (Al_2O_3) mostraram uma tendência de aumento como o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas.

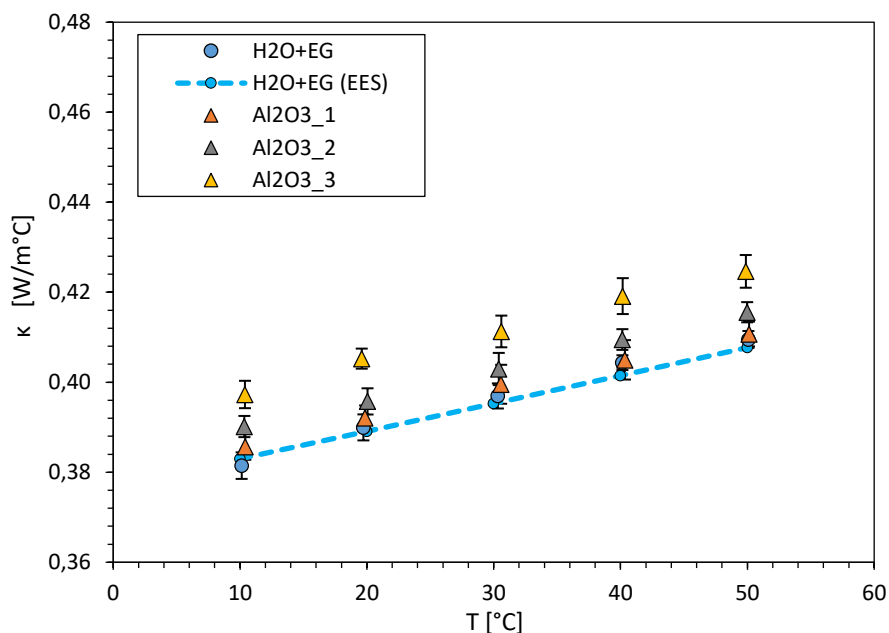


Figura 4.5 - Condutividade térmica dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido.

Assim, na Fig. 4.5 os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3) foram em média 0,5%, 1,6% e 3,8% para as amostras Al_2O_3_1 , Al_2O_3_2 e Al_2O_3_3 , respectivamente. No entanto, é importante evidenciar que para as duas amostras de menor concentração (Al_2O_3_1 e Al_2O_3_2), os incrementos foram praticamente insignificantes, já que estão dentro da faixa de incerteza do equipamento. Ao contrario com o observado na condutividade dos nanofluidos de prata (Ag), nenhuma influência da temperatura no incremento da condutividade térmica do nanofluidos foi observada. Os baixos incrementos da condutividade nas amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3) podem estar relacionados aos efeitos das instabilidades da dispersão apresentadas nas amostras como descrito na seção 3.1.1 e a natureza mesma do tipo de material utilizado, já que, entre os materiais das nanopartículas utilizadas para a produção das amostras de nanofluido é o que apresenta menor condutividade térmica (33 W/m.K). Como descrito por, (OLIVEIRA, 2018) as aglomerações de nanopartículas de tamanhos maiores tendem a sedimentar com o passar do tempo, resultando em uma diminuição da concentração e também em finas camadas floculadas dispersas no fluido base, favorecendo à diminuição da condutividade térmica.

A Fig. 4.6, mostra os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono (CNT) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições.

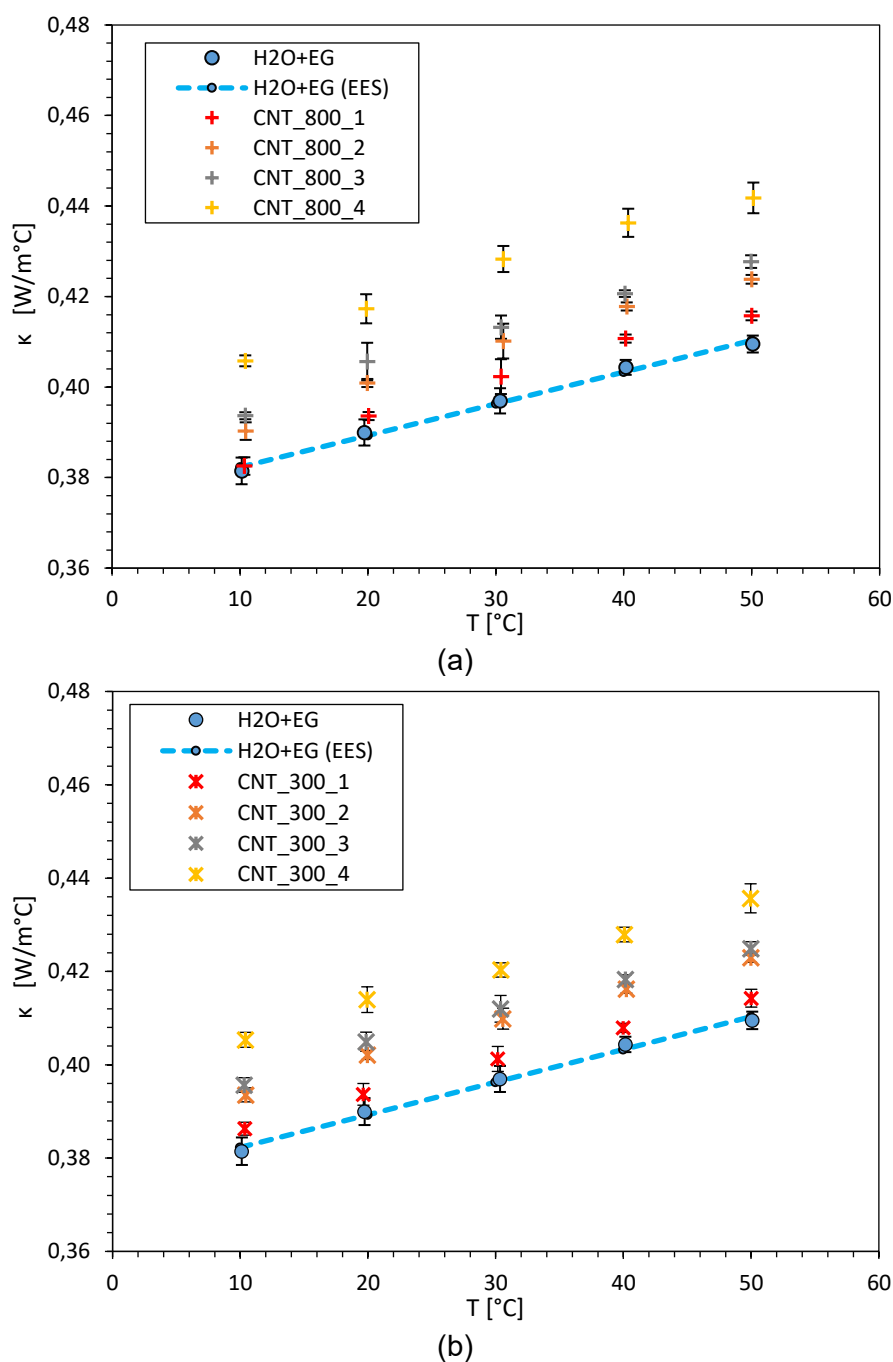


Figura 4.6 - Condutividade térmica dos nanofluidos de Nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) CNT com razão de aspecto $r=800$. (b) CNT com razão de aspecto $r=300$.

Portanto, na Fig.4.6a pode ser observado que os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$), foram em média 1,1%, 3,5%, 3,9% e 7,4% para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4 respectivamente. Na Fig. 4.4b pode ser observado os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de nanotubo de

carbono com razão de aspecto ($r=l/d=300$) foram em média 1,0%, 3,1%, 3,7% e 6,1% para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4 respectivamente.

Como era de se esperar, a condutividade dos nanofluidos de nanotubo de carbono (CNT_300 e CNT_800) mostraram uma tendência de aumento com a adição de nanopartículas. No entanto, os incrementos foram minimamente superiores nas amostras de nanofluido com nanopartículas de maior razão de aspecto (CNT_800). Este comportamento foi mais evidente na amostra de maior concentração de nanopartículas (CNT_800_4), já que, quando comparada com a amostra de nanofluido da mesma concentração e menor razão de aspecto (CNT_300_4), o aumento da condutividade térmica foi superior em 1,6%. Esta diferença na condutividade é explicada pelo fato que as nanopartículas que possuem menor diâmetro apresentam uma área específica maior. Portanto, uma maior área específica, significa que existem mais moléculas de líquido próximas da superfície das nanopartículas de nanotubo de carbono, mesmo que as amostras apresentem igual concentração. Estas moléculas de líquido podem formar uma estrutura de camada, chamada por (YU, RICHTER, *et al.*, 2000) de camada interfacial e que segundo Jiang, (JIANG, DING e PENG, 2009), pode aumentar a condutividade térmica do nanofluido.

Por outro lado, quando comparados os incrementos da condutividade térmica das amostras de nanotubo de carbono (CNT) com os incrementos obtidos nas amostras de nanofluido de prata (Ag), poder ser percebido que as amostras de nanofluido de prata (Ag) apresentaram incrementos mais significativos que os obtidos com as amostras de nanotubo de carbono (CNT) nas mesmas concentrações volumétricas de nanopartícula. Isto pode ser devido à quantidade de tensoativo ou surfactante (1,8-2 wt%) contida nas soluções funcionalizadas de alta concentração a partir das quais foram produzidas as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300), que favorece à estabilidade das amostras, mas, prejudica à condutividade térmica da mistura. No entanto, os incrementos da condutividade térmica das amostras de nanotubo de carbono (CNT) foram superiores os incrementos obtidos na condutividade térmica das amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3) na mesma concentração volumétrica de nanopartícula.

A Fig. 4.7, apresenta os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluidos de diamante (DO) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições.

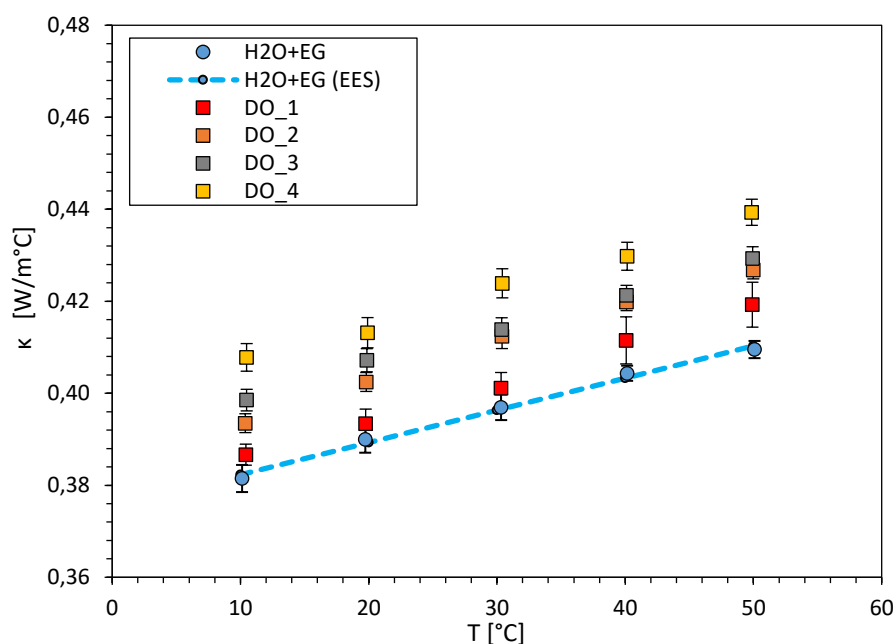


Figura 4.7 - Conduktividade térmica dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido.

Na Fig. 4.7 pode ser observado que os incrementos obtidos na conduktividade térmica dos nanofluidos de diamante (DO) com diâmetro médio de 3-6nm foram em média 1,4%, 3,6%, 4,4% e 6,6% para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4 respectivamente. É importante ressaltar que os incrementos da conduktividade térmica obtidos nas amostras de diamante foram levemente superiores nas três amostras de menor concentração volumétrica quando comparado com as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. No entanto, nas amostras de maior concentração volumétrica de nanopartícula diamante (DO_4) e de nanotubo de carbono menor razão de aspecto (CNT_300) os incrementos da conduktividade térmica foram praticamente os mesmos. Isto pode ser verificado na Fig. 4.8 que apresenta os valores da conduktividade térmica relativa das amostras de maior concentração de todos os nanofluidos produzidos a base da mistura ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%). Nesse sentido, pode ser observado que as amostras de nanofluido de prata (Ag_20_3 e Ag_80_3) foram as que apresentaram os maiores incrementos de conduktividade térmica entre os nanofluidos a base da mistura ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%), destacado o máximo incremento de 15,2% obtido na amostra Ag_80_3 referente à temperatura de 50 °C. Por outro lado, é evidente que as amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3 _3) foram as que apresentaram o menor incremento de conduktividade térmica. Finalmente, as amostras de nanofluido que utilizaram nanopartículas a base carbono (CNT_800_4, CNT_300_4 e DO_4) apresentaram incrementos de conduktividade térmica que variam entre 6 a 8%.

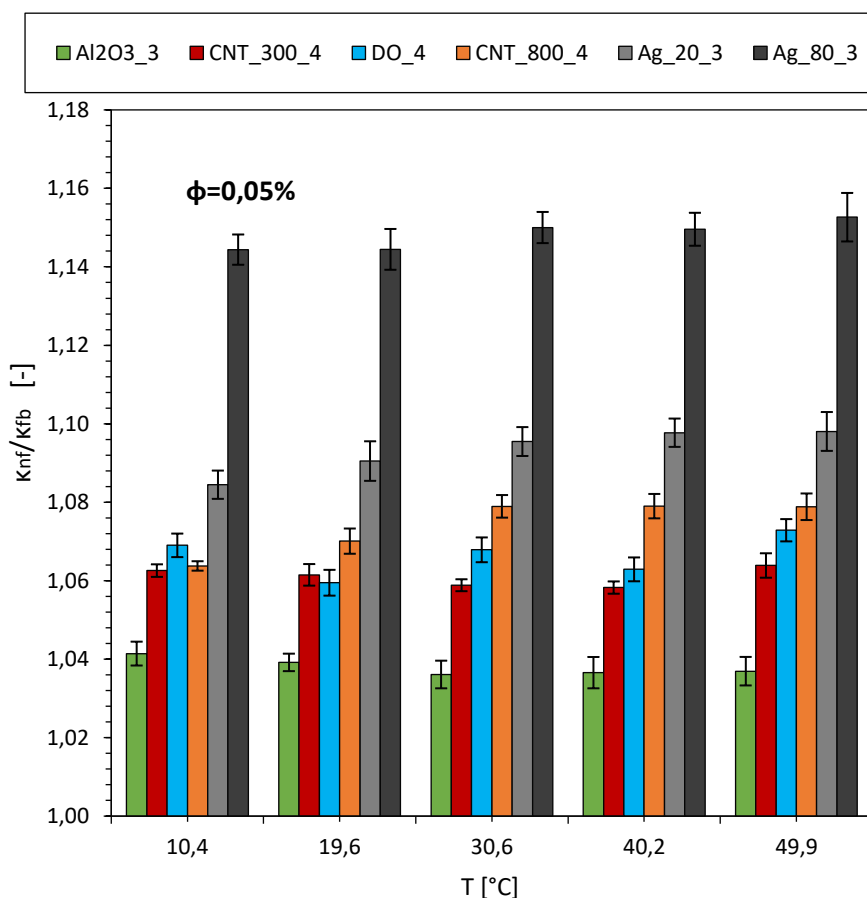


Figura 4.8 – Condutividade térmica relativa das amostras de nanofluidos com maior concentração volumétrica de nanopartículas em função da temperatura.

4.2.4. Viscosidade dinâmica

A seguir são apresentados os resultados experimentais das medições realizadas da Viscosidade das amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%). Na Fig. 4.11 são ilustrados os resultados experimentais da viscosidade dinâmica e a viscosidade relativa das diferentes amostras de nanofluido de prata (Ag) em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições.

É importante destacar a boa concordância entre os dados experimentais da viscosidade dinâmica do fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%) e os dados de referência obtidos por intermédio da base de dados do software EES, os quais apresentaram um desvio máximo de 1,13% dentro da faixa de temperatura analisada. Nas Figs. 4.9a e 4.9c são apresentados especificamente os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido Ag₂₀ e Ag₈₀, onde pode ser observado que a viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido e do fluido base decresce exponencialmente com o aumento da temperatura.

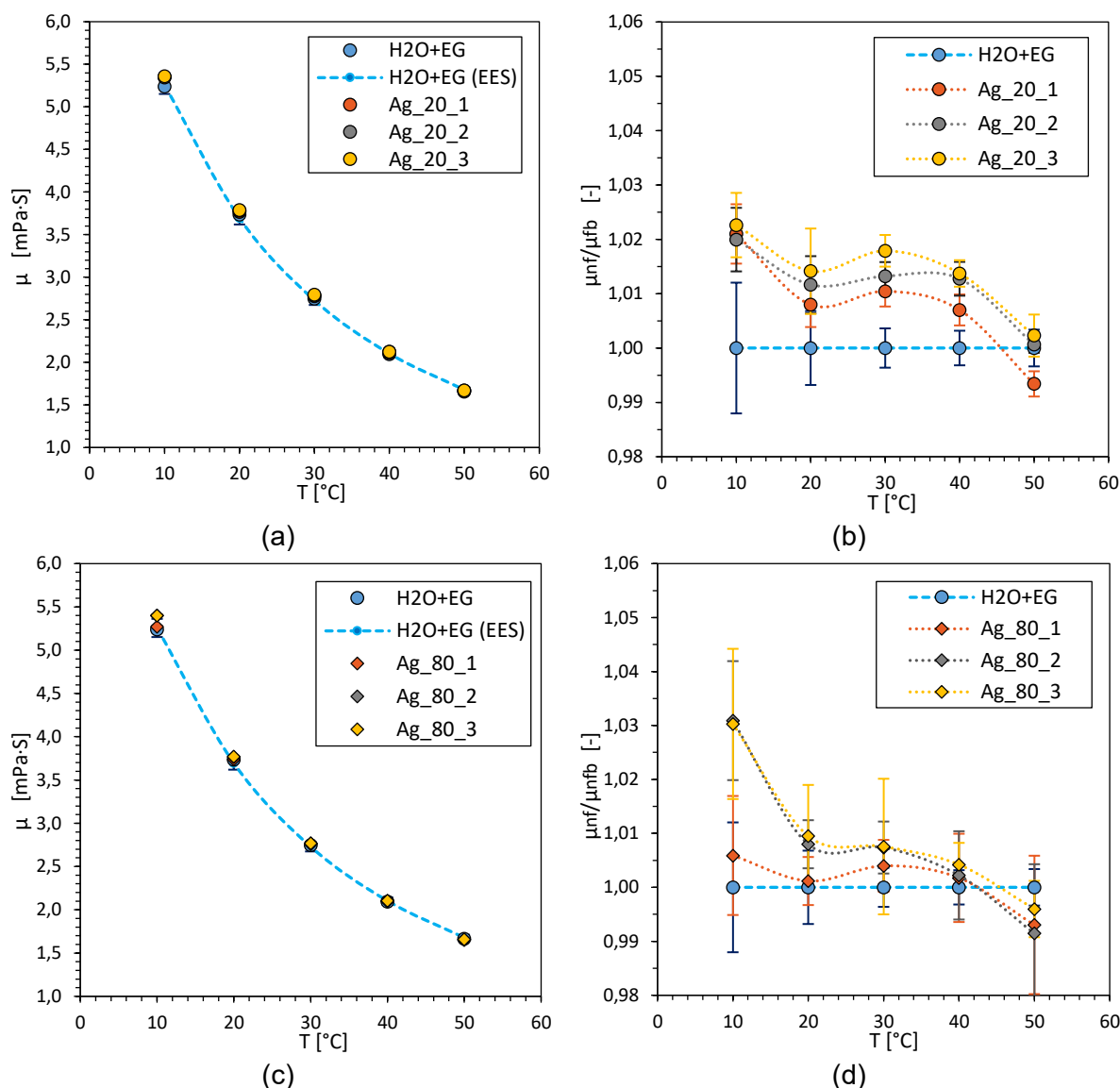


Figura 4.9 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de prata (Ag) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, Ag com $d=20$ nm. (b) Viscosidade relativa, Ag com $d=20$ nm. (c) Viscosidade dinâmica, Ag com $d=80$ nm. (d) Viscosidade relativa, Ag com $d=80$ nm.

Por outro lado, as Figs. 4.9b e 4.9d ilustram os resultados da viscosidade relativa das amostras de nanofluido Ag_20 e Ag_80 respectivamente em função da temperatura do fluido, usando como referência a viscosidade dinâmica do fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%). Assim, na Fig. 4.9b pode ser observado que os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de prata (Ag) com partículas de diâmetro de 20 nm foram em média 0,8%, 1,2% e 1,4% para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente. Na Fig. 4.9d os incrementos obtidos da viscosidade dinâmica nas amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 80 nm foram em média 0,12%, 0,8% e 1,0% para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente. Nesse sentido, devido às baixas

concentrações de nanopartícula os incrementos da viscosidade dinâmica foram pouco representativos, ainda assim, foi possível notar o aumento da viscosidade com a adição de nanopartículas.

A Fig. 4.10a, ilustra os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos de alumina (Al_2O_3) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições. Na Fig. 4.10b pode ser observado que a viscosidade dos nanofluidos de alumina (Al_2O_3) mostraram uma tendência de aumentou como o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas.

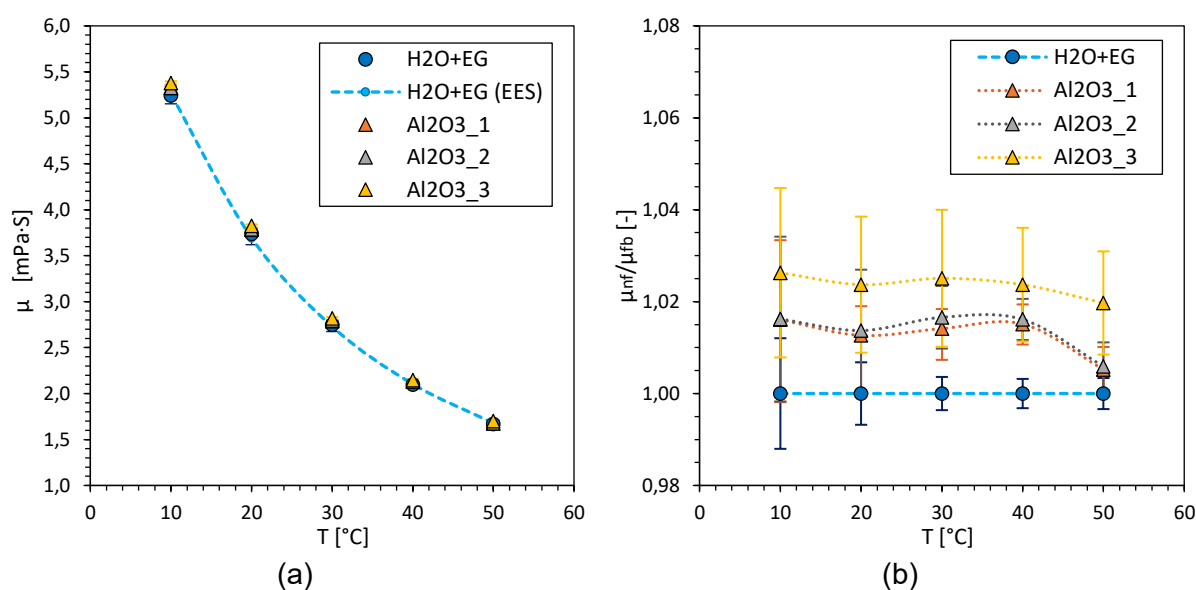


Figura 4.10 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de Alumina (Al_2O_3) em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica. (b) Viscosidade relativa.

Assim, na Fig. 4.10b os incrementos obtidos na viscosidade das amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3) foram em média 1,3%, 1,4% e 2,4% para as amostras Al_2O_3_1 , Al_2O_3_2 e Al_2O_3_3 , respectivamente. No entanto, os incrementos na viscosidade das amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3) mostraram uma de ser levemente superiores aos incrementos obtidos nas amostras de nanofluido de prata (Ag_{20} e Ag_{80}) na mesma concentração volumétrica de nanopartículas.

A Fig. 4.11 apresenta os resultados experimentais da viscosidade dinâmica e a viscosidade relativa das diferentes amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições. Nesse sentido, as Figs. 4.11a e 4.11c mostram especificamente os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300, respectivamente, onde pode ser observado que as amostras de nanofluido apresentaram valores superiores de

viscosidade dinâmica quando comparado com o fluido base. Isto pode ser visto em detalhe, nas Figs. 4.11b e 4.11d que mostram os resultados da viscosidade relativa das amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300 respectivamente em função da temperatura do fluido, usando como referência a viscosidade dinâmica do fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%).

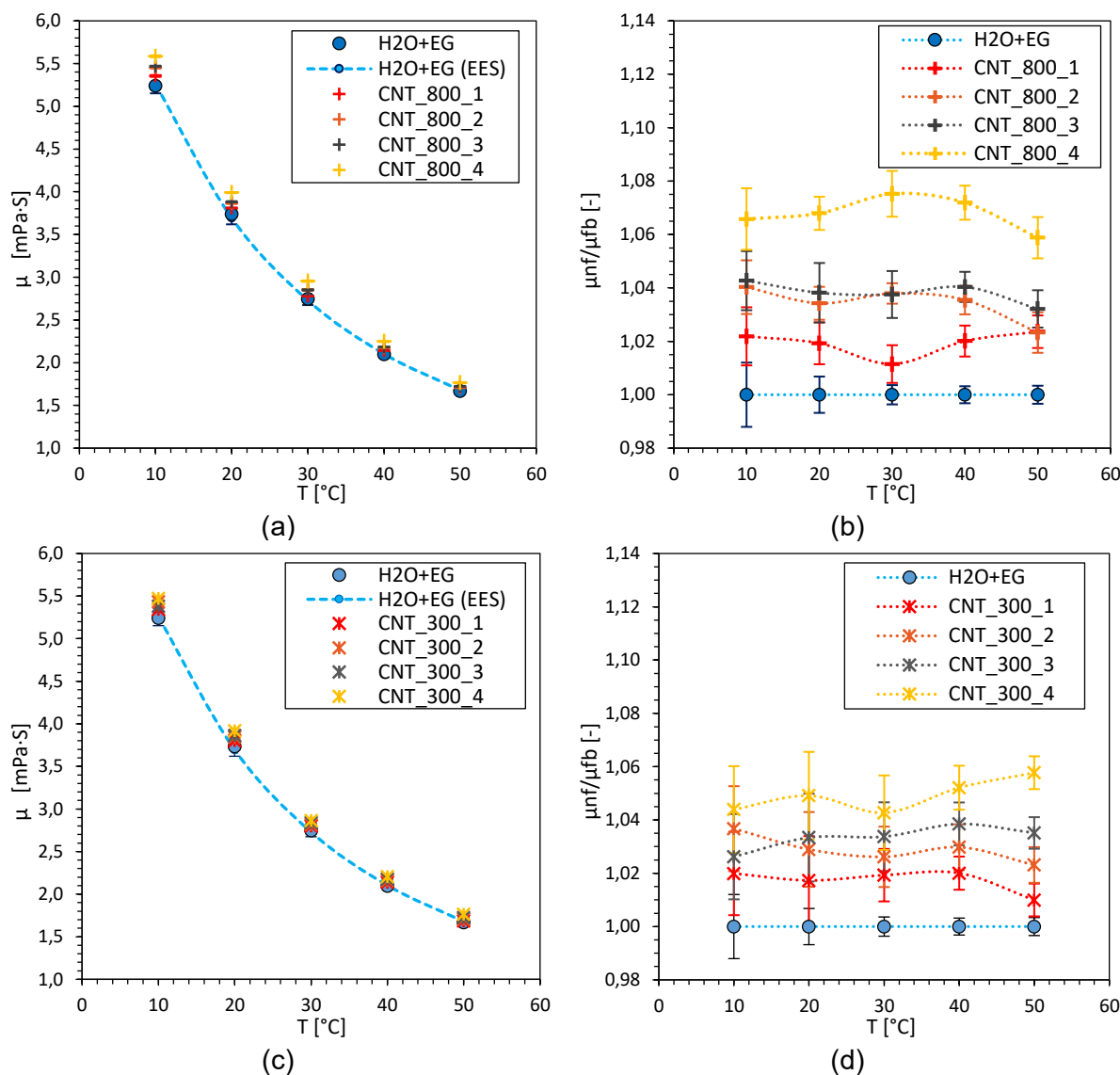


Figura 4.11 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, CNT_800. (b) Viscosidade relativa, CNT_800. (c) Viscosidade dinâmica, CNT_300. (d) Viscosidade relativa, CNT_300.

Portanto, na Fig. 4.11b pode ser observado que os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$), foram em média 1,9%, 3,4%, 3,8% e 6,8% para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. Na Fig. 4.11d os incrementos obtidos da viscosidade nas

amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=300$), foram em média 1,7%, 2,9%, 3,3% e 4,9% para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente.

As Figs. 4.11b e 4.11d mostram que existe uma tendência do tamanho da nanopartícula no incremento da viscosidade do nanofluido, já que as amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$) apresentaram maiores incrementos de viscosidade quando comparados com as amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=300$). Este comportamento é mais evidente nas amostras de maior concentração de cada tipo de nanofluido (CNT_800_4 e CNT_300_4) cujos incrementos na viscosidade foram 6,8% e 4,9%, respectivamente.

Segundo (AGARWAL, VAIDYANATHAN e KUMAR, 2013), através de um estudo com nanofluido de alumina de diferente tamanho (13 e 15 nm) a base de querosene, concluíram que este comportamento do nanofluido é devido à maior resistência da nanopartícula de menor diâmetro com a interface do fluido, que é provocada pela sua maior área de superfície. Nesse sentido, a tendência observada nos resultados experimentais é consequente com a afirmação de (AGARWAL, VAIDYANATHAN e KUMAR, 2013), visto que, as duas nanopartículas de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) possuem aproximadamente o mesmo comprimento ($l \approx 10 \text{ a } 30 \mu\text{m}$), entretanto, indicam diâmetros diferentes, como descrito na Tab. 2.1, onde as nanopartículas CNT_800 possuem o menor diâmetro ($d \approx 20 \text{ a } 30 \text{ nm}$) e as nanopartículas CNT_300 o diâmetro maior ($d \geq 50 \text{ nm}$).

A Fig. 4.12a, ilustra os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos de diamante (DO) e do fluido base em função das diferentes temperaturas nas que foram realizadas as medições. Deste modo, pode ser notado que os nanofluidos de diamante apresentaram valores superiores de viscosidade dinâmica aos obtidos com o fluido base. No entanto para observar o efeito da concentração de nanopartículas, na Fig. 4.12b são apresentados os valores da viscosidade relativa dos nanofluidos de diamante (DO) em função da temperatura do fluido, usando como referência a viscosidade dinâmica do fluido base ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG } 50:50 \text{ wt\%}$).

Portanto, como mostrado na Fig. 4.12b os incrementos obtidos na viscosidade das amostras de nanofluido de diamante (DO) foram em média 1,4%, 2,2%, 3,1% e 3,6% para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4, respectivamente. Por consequência, pode ser verificado o efeito que a adição de nanopartículas tem no aumento da viscosidade dos nanofluidos, mesmo com baixa concentração de nanopartículas, assim como foi observado nas amostras de nanofluido dos outros tipos de nanopartícula. Muitos trabalhos têm sido publicados sobre o efeito da concentração de nanopartículas sobre a viscosidade de

nanofluidos. Em geral, os resultados mostram que à medida que se adiciona nanopartículas ao fluido base, a viscosidade do nanofluido incrementa, mesmo em casos de baixa concentração. (ZANJANI, MANSOURKIAEI, *et al.*, 2016), por exemplo, observaram que a viscosidade do nanofluido de grafeno e água aumentava com o aumento da concentração em volume das nanopartículas considerando concentrações muito baixas (<0,02%). (CÁRDENAS, PAZ e BANDARRA FILHO, 2017), também observaram incrementos significativos na viscosidade com a adição de nanopartículas em amostras de nanofluidos de nanotubo de carbono a base de água, mesmo para baixas concentrações volumétricas de nanopartículas (<0,052%).

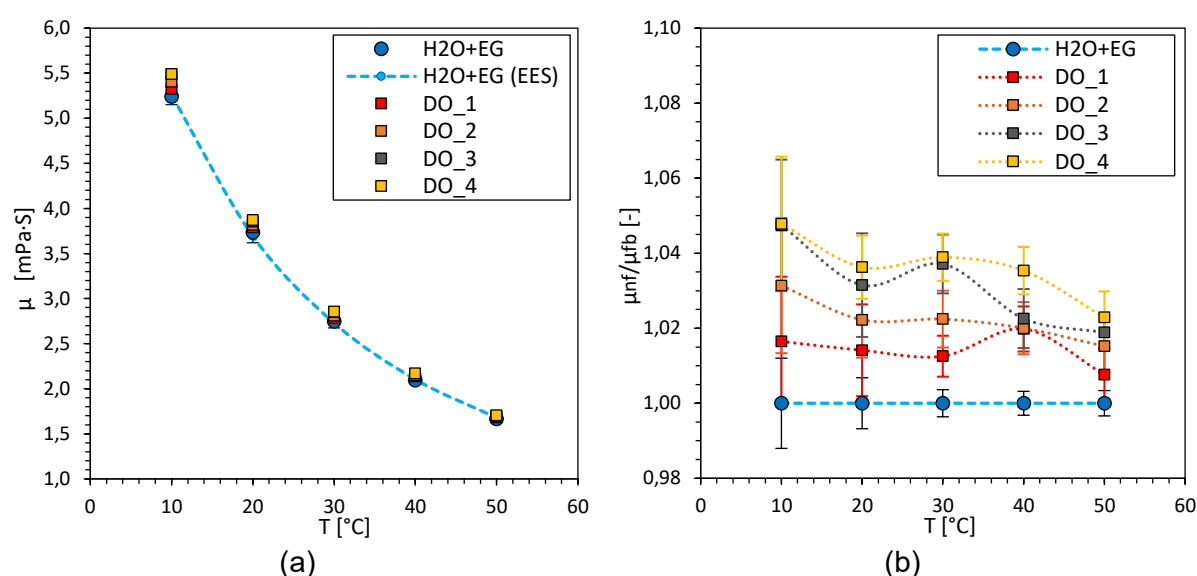


Figura 4.12 – Viscosidade dinâmica dos nanofluidos de diamante (DO) em função da variação da temperatura do fluido.

Quando comparado os incrementos relativos médios da viscosidade entre as amostras de nanofluido com nanopartículas a base de carbono (CNT_800, CNT_300 e DO) na mesma concentração em volume de nanopartícula, pode ser percebido que os nanofluidos de diamante foram os que apresentaram em média os menores incrementos relativos de viscosidade. Este comportamento, pode ser atribuído à quantidade de surfactante (1,8-2 wt%) contida nas soluções funcionalizadas de alta concentração a partir das quais foram produzidas as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300), como descrito anteriormente ou por um possível efeito da forma das nanopartículas, que no caso das nanopartículas de diamante o fabricante expressa que apresentam um formato esférico.

Segundo (MISHRA, MUKHERJEE, *et al.*, 2014) diversos autores relataram que a adição de nanopartículas em baixíssimas concentrações não é o único parâmetro que influi no aumento da viscosidade do nanofluido. Eles consideram que a forma e o tamanho da

nanopartícula, a adição de surfactante, e a taxa de cisalhamento são parâmetros que afetam à viscosidade do nanofluido. Nesse sentido os incrementos na viscosidade do nanofluido também podem ser atribuídos à forma da nanopartícula, como foi observado num estudo realizado por (TIMOFEEVA, ROUTBORT e SINGH, 2009), que reportou a existência de uma forte dependência deste parâmetro na viscosidade dos nanofluidos. Eles mostraram que para nanofluidos de alumina a base de (H₂O/EG) de igual concentração em volume de nanopartícula, as amostras de nanofluido cujas nanopartículas são de formatos cilíndricos ou de folhas, apresentaram incrementos de viscosidade mais elevados quando comparados com nanofluidos que possuem nanopartículas com formatos de esferas ou esferoides. Eles afirmaram que a dependência da viscosidade com a forma da nanopartícula é devido ao aumento da taxa de cisalhamento por causa das interações entre as nanopartículas, que indicam alguma restrição no movimento do fluido.

Segundo (TIMOFEEVA, GAVRILOV, *et al.*, 2007) em estado estacionário uma partícula de formato cilíndrico ou um aglomerado alongado pode ter dois tipos de movimento devido aos movimentos brownianos: o primeiro deles, o movimento rotacional em torno do centro do comprimento do nanotubo e segundo movimento translacional que pode acontecer em paralelo ou perpendicular ao comprimento do nanotubos. Nesse sentido, quando o espaçamento médio entre as partículas é muito superior à maior dimensão da partícula (comprimento do nanotubo), os movimentos de rotação e translação não são restritos entre eles; portanto, é esperado que a tensão de cisalhamento seja pouco influenciada por causa das interações entre as nanopartículas, minimizando o efeito da forma no incremento da viscosidade do nanofluido.

No entanto, (TIMOFEEVA, GAVRILOV, *et al.*, 2007) descrevem que o movimento livre das partículas é possível quando a fração de volume corresponde entre, $0 < \varphi < 1/r^2$, sendo, r , a razão de aspecto. Assim, segundo esta afirmação, para existir movimento livre de nanopartículas nas amostras de nanofluido produzidas com nanotubo de carbono, a concentração em volume de nanopartícula deve ser menor que $\varphi < 0,00015\%$ no caso das nanopartículas (CNT_800) e no caso das nanopartículas (CNT_300) deve ser menor que $\varphi < 0,0011\%$, de modo contrário, os efeitos das interações entre as nanopartículas são significativos no aumento da viscosidade do nanofluido. Por outro lado, nas amostras de nanofluido com nanopartículas de formato esférico (Ag_80, Ag_20, Al₂O₃ e DO) para existir o movimento livre de nanopartículas a concentração em volume deve ser menor que $\varphi < 1\%$ sem a presença de aglomerados que modifiquem o formato das partículas. Assim, mesmo considerando às amostras de nanofluido de nanotubos de carbono sem a presença de aglomerações, pode ser considerado o efeito da forma da nanopartícula no incremento da

viscosidade, dado que, a amostra de nanofluido de menor concentração em volume foi $\phi \approx 0,001\%$, referente às amostras CNT_800_1 e CNT_300_1.

Isto pode ser verificado na Fig. 4.13 que apresenta os valores da viscosidade relativa das amostras de maior concentração de todos os nanofluidos produzidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%). Nesse sentido, pode ser observado que as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800_4 e CNT_300_4) foram as que apresentaram os maiores incrementos de viscosidade dinâmica entre os nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), destacado o máximo incremento de 7,5% obtido na amostra CNT_800_4 referente à temperatura de 30 °C.

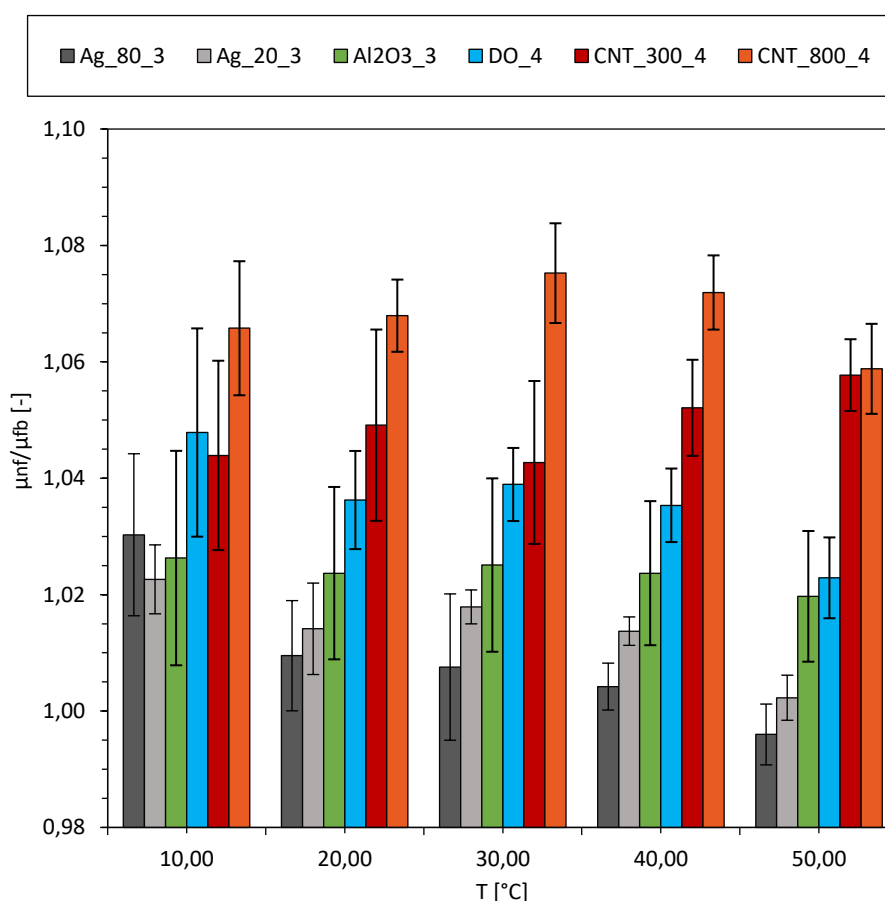


Figura 4.13 – Viscosidade relativa das amostras de nanofluidos com maior concentração volumétrica de nanopartículas em função da temperatura.

4.3. Propriedades termofísicas no nanofluidos a base de óleo térmico (OT-100)

4.3.1. Massa específica

Nas Fig. 4.14a e 4.14c são apresentados os resultados experimentais da massa específica de todas as amostras de nanofluido produzidos a base de óleo térmico, OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente, cujas concentrações volumétricas são aquelas descritas pela Tab. 3.5. Os resultados foram comparados com a massa específica do fluido base em função da temperatura nas quais foram realizadas as medições.

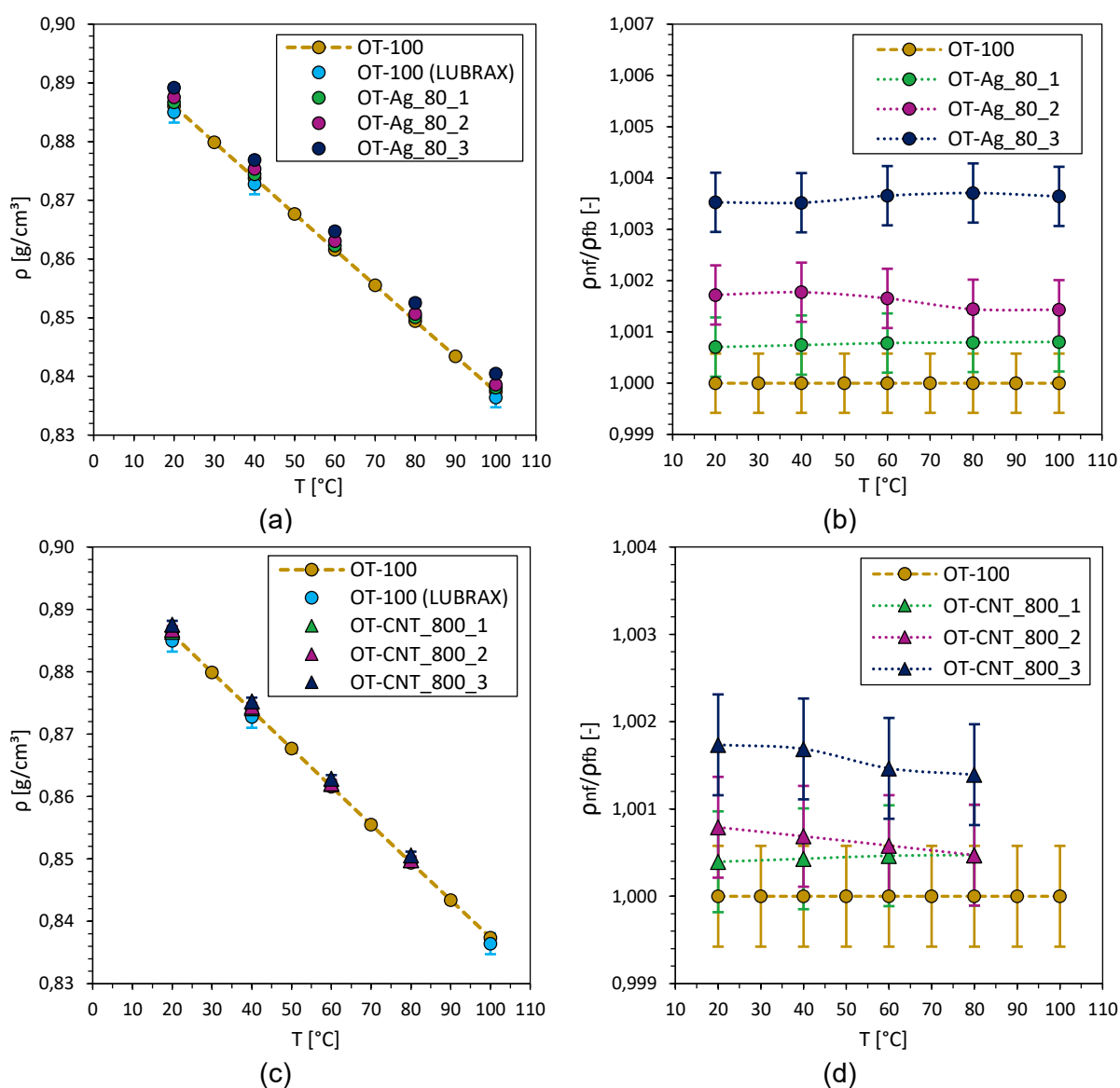


Figura 4.14 - Massa específica e massa específica relativa dos nanofluidos a base de OT-100 em função da variação da temperatura do fluido. (a) Massa específica, OT-Ag_80. (b) Massa específica relativa, OT-Ag_80. (c) Massa específica, OT-CNT_800. (d) Massa específica relativa, OT-CNT_800.

Na Fig. 4,14, é importante evidenciar a boa concordância entre os dados experimentais da massa específica do óleo (OT-100) e os dados da massa específica fornecido pela ficha técnica do óleo LUBRAX OT-100 apresentados no APÊNDICE III, onde o desvio máximo apresentado foi de 0,11%. Nas Figs. 4.14a e 4.14c pode ser observado que as amostras de nanofluido apresentaram valores superiores de massa específica quando comparado com o fluido base. Os incremento da massa específica dos nanofluido a base de (OT-100) pode ser observado com detalhe nas Figs. 4.14b e 4.14d, que mostram os resultados da massa específica relativa das amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente, usando como referência a massa específica do fluido base (OT-100).

Na Fig. 4.15 pode ser observada a comparação dos incrementos relativos da massa específica obtidos experimentalmente de todas as amostras de nanofluido a 20 e 40 °C com os resultados obtidos dos incrementos da massa específica utilizando o modelo da regra da mistura descrito pela Eq. 2.2, aplicado por (PAK e CHO, 1998).

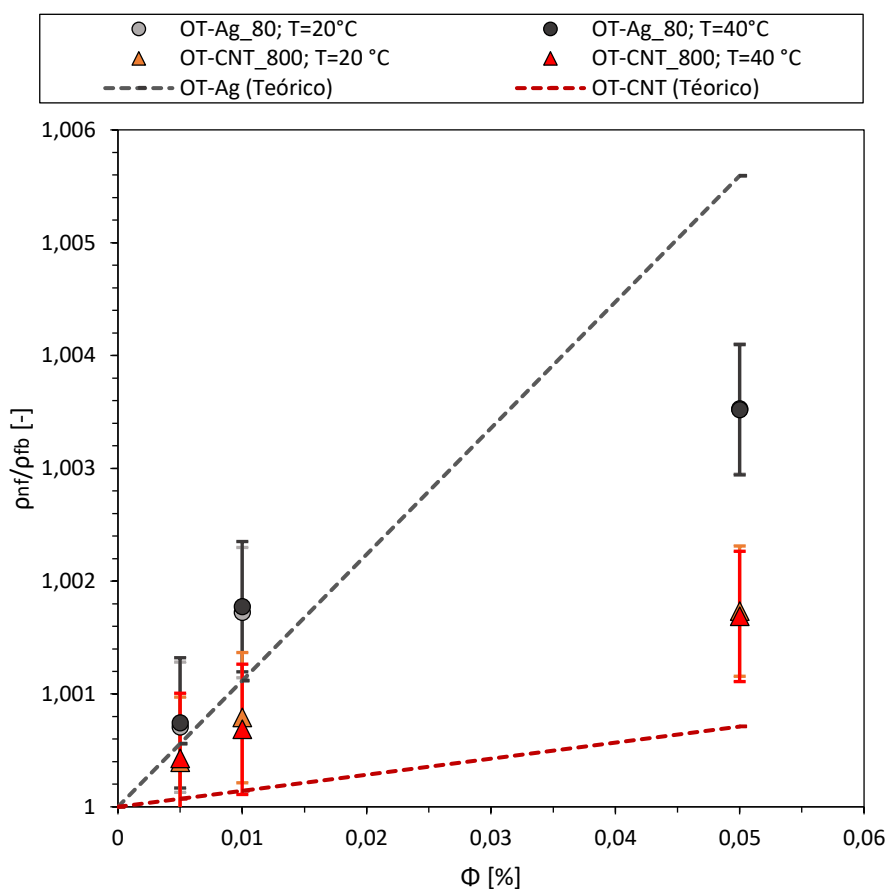


Figura 4.15 - Massa específica relativa dos nanofluidos a base de OT-100 em função da concentração volumétrica.

Assim, na Fig. 4.15 pode ser verificada a influência da concentração e da massa específica da nanopartícula na massa específica dos nanofluidos a base de óleo térmico. Consequentemente, como era de se esperar, na Fig. 4.2 pode ser observado que incrementos relativos da massa específica das amostras de nanofluido de prata (OT-Ag) em função da concentração foram superiores aos incrementos relativos da massa específica das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (OT-CNT), visto que, as nanopartículas de prata (Ag) possuem a maior massa específica que as nanopartículas de nanotubo de carbono (CNT).

Por outro lado, com objetivo de verificar a concordância entre os resultados experimentais e os obtidos através do modelo descrito pela Eq. 2.2, adotando como parâmetro de comparação os resultados obtidos das medições realizadas a 20 °C, a Tab. 4.2 apresenta os desvios apresentados entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura.

Tabela 4.2 - Comparação dos valores massa específica entre os resultados experimentais e os resultados obtidos utilizando o modelo da regra da mistura para todas as amostras de nanofluido a base de (OT-100)

Amostra	Φ [%]	ρ $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$		Desvio [%]
		Exp. [$\pm 0,0006$]	Modelo Eq. 2.2	
OT-100	[-]	0,8861	0,8850	0,11
	0,005	0,8867	0,8856	0,12
OT-Ag_80	0,01	0,8876	0,8861	0,17
	0,05	0,8892	0,8899	-0,08
	0,005	0,8864	0,8852	0,14
OT-CNT_800	0,01	0,8868	0,8852	0,17
	0,05	0,8876	0,8857	0,21

Portanto, na Tab. 4.2 pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos por intermédio do modelo da regra da mistura para a massa específica, onde os desvios máximo e médio obtidos foram de 0,21% e 0,12%. Consequentemente, foi verificado que modelo descrito pela Eq. 2.2 para estimar a massa específica dos nanofluidos pode ser utilizado para determinar a massa específica dos nanofluidos a base de óleo térmico (OT-100).

4.3.2. Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100), $c_{p,nf}$, foi determinado, empregando um modelo clássico baseado no equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido circundante dado pela Eq. 2.5, que considera a concentração volumétrica das nanopartículas, ϕ , e a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão, $(\rho c_p)_{fb}$ e $(\rho c_p)_{np}$. Assim, na Fig. 4.16 são apresentados os valores do calor específico de todas as amostras de nanofluido a base de (OT-100), cujas concentrações volumétricas são aquelas descritas pela Tab. 3.5. Os resultados foram comparados com calor específico do fluido base (OT-100) em função da temperatura.

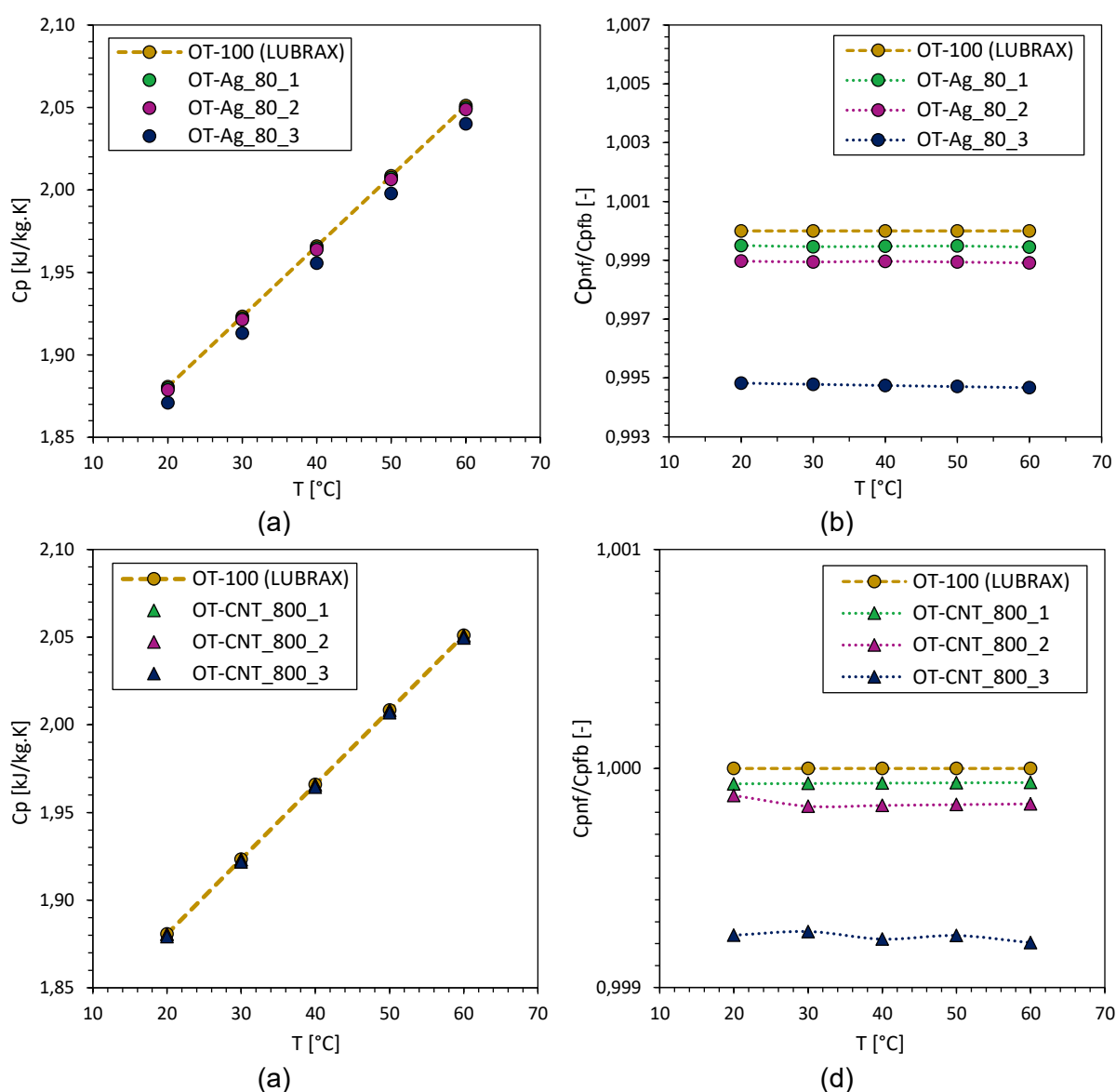


Figura 4.16 - Calor específico e relativo dos nanofluidos em função da variação da temperatura do fluido. (a) C_p , OT-Ag_80. (b) C_p -relativo, OT-Ag_80. (c) C_p , OT-CNT_800. (d) C_p -relativo, OT-CNT_800.

Portanto nas Fig. 4.16b e 4.16d pode ser verificado que o calor específico das amostras de nanofluido apresentaram uma diminuição com o incremento da concentração de nanopartícula, dado que, o calor específico obtido por intermédio do modelo matemático descrito na Eq. 2.5 considera as prioridades físicas (calor específico e massa específica) dos elementos da mistura (óleo e nanopartículas) admitindo os efeitos da concentração e da temperatura. Nesse sentido, se o calor específico das nanopartículas é menor que o calor específico do líquido base, consequentemente, o calor específico da mistura diminui em função do aumento da concentração volumétrica da nanopartícula.

4.3.3. Condutividade térmica

A seguir são apresentados os resultados experimentais das medições realizadas da condutividade térmica das amostras de nanofluido a base OT-100. Na Fig. 4.17 são ilustrados os resultados experimentais da condutividade térmica e a condutividade térmica relativa das diferentes amostras de nanofluido de prata (OT-Ag_80) e nanotubo de carbono (OT-CNT_800) em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições.

É importante destacar mais uma vez a boa concordância entre os dados experimentais da condutividade térmica do fluido base (OT-100) e os dados de referência obtidos da ficha técnica fornecida pela PETROBRAS, os quais apresentaram um desvio máximo de 0,73% dentro da faixa de temperatura analisada. Nas Figs. 4.17.a e 4.17c são apresentados especificamente os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente em função da temperatura do fluido, onde são observados valores superiores para a condutividade térmica dos nanofluidos, quando comparados com o fluido base.

Por outro lado, com objetivo de observar em detalhe incrementos da condutividade dos nanofluidos, as Figs. 4.17b e 4.17d ilustram os resultados da condutividade térmica relativa das amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente em função da temperatura do fluido, usando como referência a condutividade do fluido base (OT-100). Assim, na Fig. 4.17b pode ser observado que os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de prata (Ag) com partículas de diâmetro de 80 nm foram em média 3,6%, 3,5% e 1,8% para as amostras OT-Ag_80_1, OT-Ag_80_2 e OT-Ag_80_3, respectivamente. Na Fig. 4.17d os incrementos obtidos da condutividade térmica nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$) foram em

média 9,8%, 18,6% e 17,9% para as amostras OT-CNT_800_1, OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente.

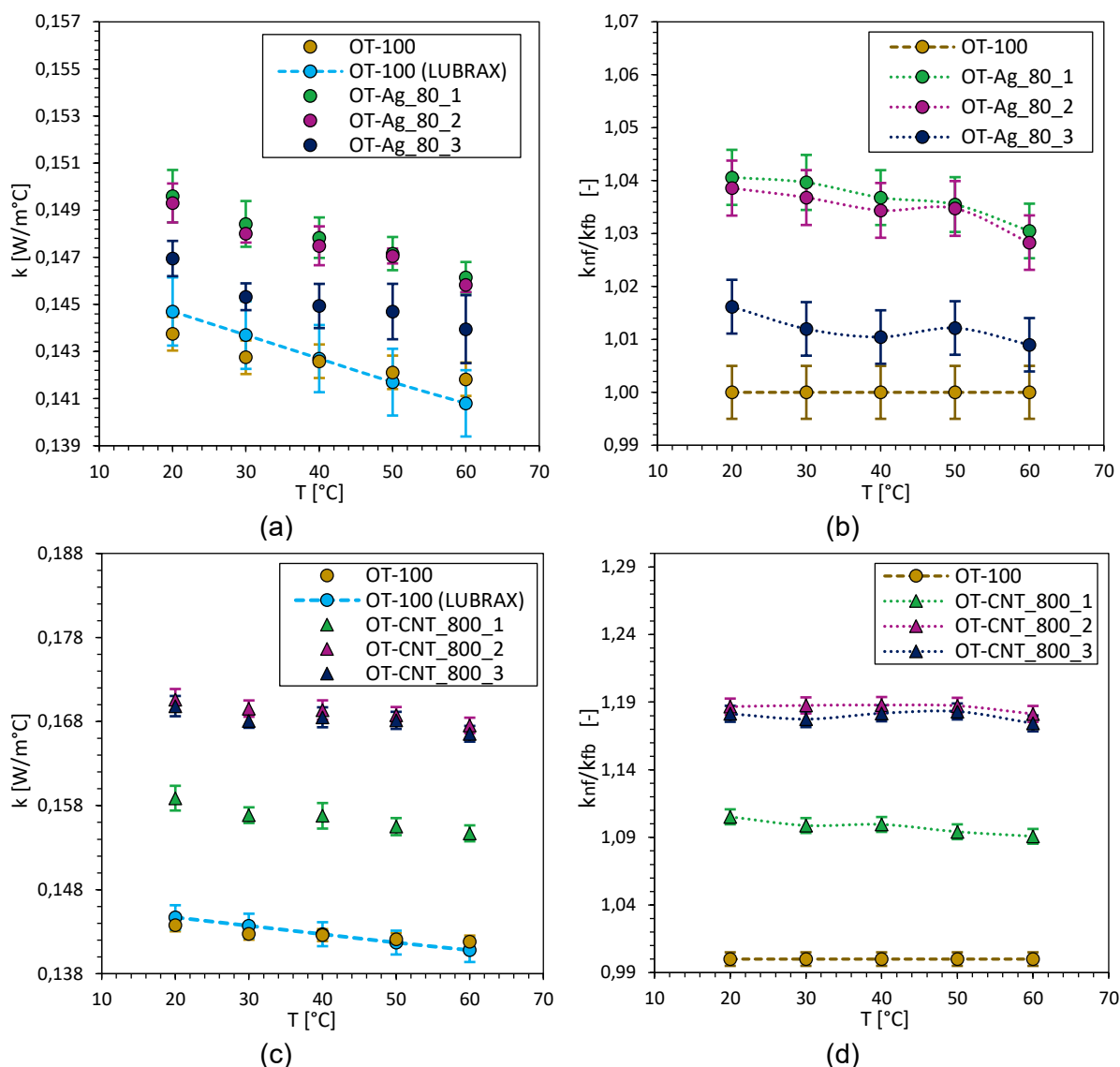


Figura 4.17 - Condutividade térmica e relativa dos nanofluidos em função da variação da temperatura do fluido. (a) Condutividade térmica, OT-Ag_80. (b) Condutividade relativa, OT-Ag_80. (c) Condutividade térmica, OT-CNT_800. (d) Condutividade relativa, OT-CNT_800.

O primeiro comportamento inferido das Figs. 4.17b e 4.17d, foi que as amostras de nanofluido a base de nanotubos de carbono (OT-CNT_800) apresentaram incrementos muito significativos na condutividade térmica quando comparados com os incrementos obtidos nas amostras de nanofluido de prata (OT-Ag_80). Este comportamento foi divergente das observações realizadas nas amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) que utilizaram o mesmo tipo de nanopartículas (CNT_800 e Ag_80). Esta divergência pode estar relacionada à diferença do processo de produção entre as amostras de nanofluido, especificamente, no caso das amostras de nanofluido com nanopartículas de nanotubo de

carbono (OT-CNT_800 e CNT_800), lembrando que, para dispersar as nanopartículas de nanotubo de carbono provenientes da solução funcionalizada no óleo térmico, a solução foi previamente submetida a um processo de secagem para a separação das nanopartículas, como descrito pela Fig. 3.6.

Nesse sentido, o processo de secagem pode ter favorecido à redução da quantidade de surfactante que era contido na solução funcionalizada, no entanto, deixando à superfície dos nanotubos revestida. Assim, nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono a base de óleo térmico (OT-CNT_800), os efeitos da concentração de surfactante, que prejudicam os incrementos na condutividade térmica das amostras de nanofluido como descrito por (ANGAYARKANNI e PHILIP, 2015) podem ter sido minimizados, consequentemente, favorecendo à contribuição dos efeitos da natureza e a forma da nanopartícula ou da nanocamada no aumento da condutividade térmica.

Por outro lado, os efeitos do movimento devido às interações de nanopartículas e ao movimento browniano, podem ter sido minimizados devido ao valor elevado da viscosidade dinâmica do óleo térmico (OT-100), minimizando os aumentos de condutividade térmica. Este comportamento seria mais preponderante nas amostras de nanofluido de prata (OT-Ag_80), dado que, a forma esférica da nanopartícula em conformidade com (TIMOFEEVA, ROUTBORT e SINGH, 2009) lhe confere movimento livre dentro do fluido circundante, sempre que, a concentração em volume seja menor a $\phi < 1\%$ sem existir a presença de aglomerados que modifiquem o formato das partículas.

Outro comportamento que pode ser verificado pelos resultados mostrados na Fig. 4.17 é que a adição de nanopartículas em óleo térmico (OT-100) aumenta a condutividade térmica. No entanto, este comportamento não foi consistente com os resultados obtidos nas amostras de nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) ou com alguma das afirmações dos diversos autores, os quais mostram que a condutividade térmica dos nanofluidos aumenta em função do aumento da concentração de nanopartículas (AHMADI, MIRLOHI, *et al.*, 2018). Isto devido à possibilidade de estar atingindo um ponto de máxima concentração nanopartículas onde os aumentos da condutividade térmica não são significativos com a adição de nanopartículas como pode ser observado na Fig. 4.18 com as amostras Ag_80 e CNT_800 a base da mistura da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), ou até mesmo, ter ultrapassado o ponto de máxima concentração de nanopartículas obtendo decrementos em função da concentração volumétrica como foi observado nas duas amostras OT-Ag_80 e OT-CNT_800 produzidas a base se óleo térmico (OT-100).

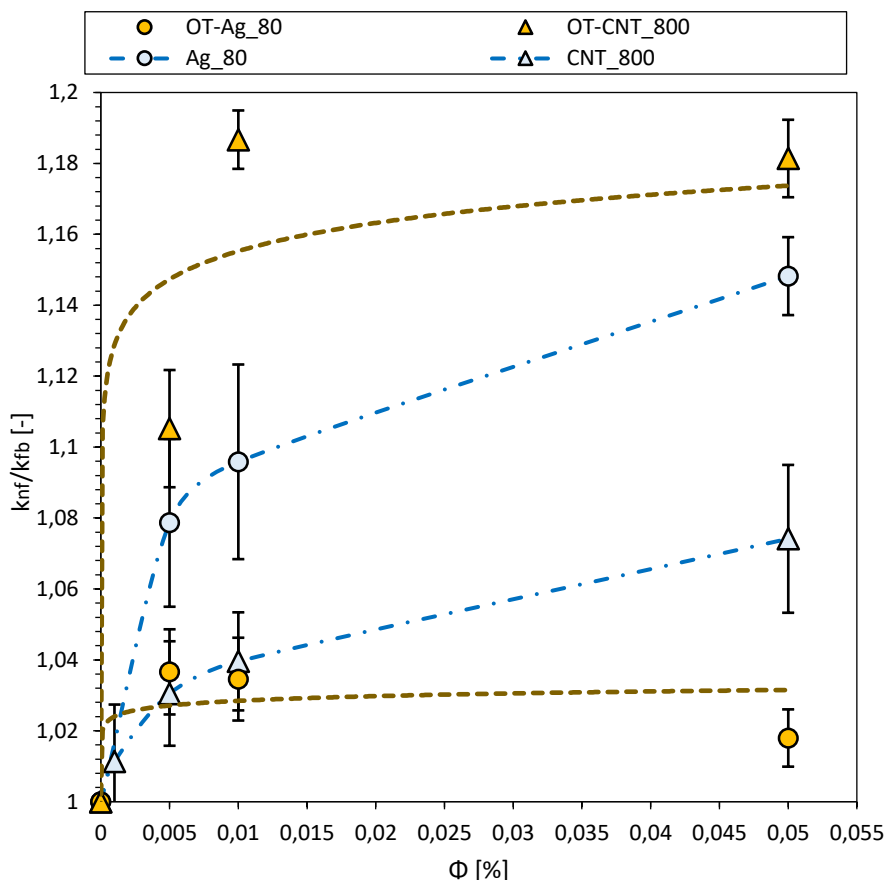


Figura 4.18 - Condutividade térmica relativa das amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100) e da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em função da concentração volumétrica.

4.3.4. Viscosidade dinâmica

A Fig. 4.19 apresenta os resultados experimentais da viscosidade dinâmica e a viscosidade relativa das diferentes amostras de nanofluido de prata (OT-Ag_80) e de nanofluido de nanotubo de carbono (OT-CNT_800) em função das temperaturas nas quais foram realizadas as medições. Nesse sentido, as Figs. 4.19a e 4.19c mostram especificamente os resultados experimentais da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente, onde pode ser observado que as amostras de nanofluido apresentaram praticamente os mesmos valores de viscosidade dinâmica quando comparado com o fluido base (OT-100). No entanto para observar o efeito da concentração em detalhe, as Figs. 4.19b e 4.19d mostram os resultados da viscosidade relativa das amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente em função da temperatura do fluido, usando como referência a viscosidade dinâmica do fluido base (OT-100).

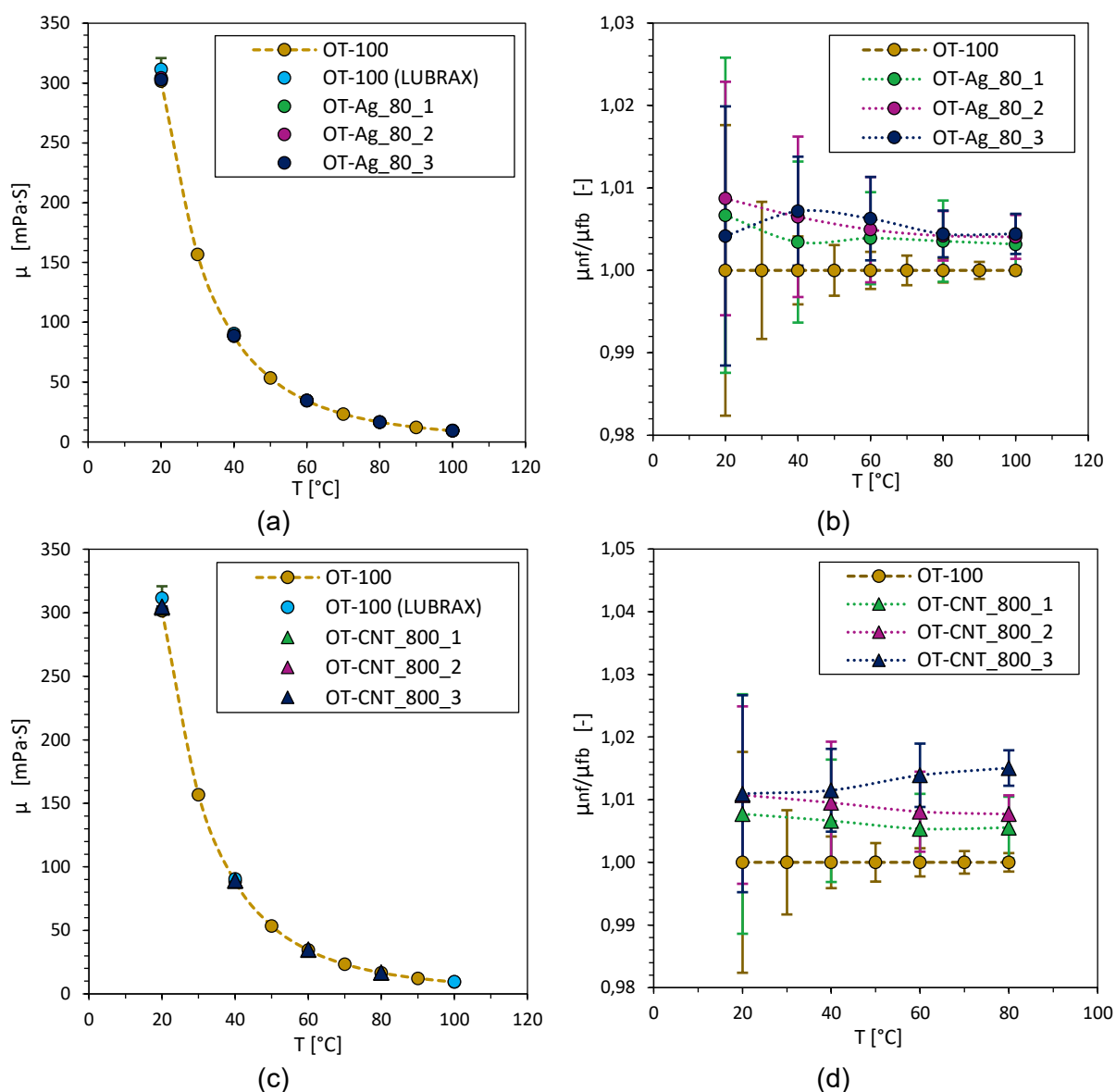


Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica e relativa dos nanofluidos de prata e nanotubo de carbono em função da variação da temperatura do fluido. (a) Viscosidade dinâmica, OT-Ag_80. (b) Viscosidade relativa, OT-Ag_80. (c) Viscosidade dinâmica, OT-CNT_800. (d) Viscosidade relativa, OT-CNT_800.

Portanto, na Fig. 4.19b os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de prata com diâmetro médio de 80 nm, foram em média 0,41%, 0,46% e 0,52% para as amostras OT-Ag_80_1, OT-Ag_80_2, e OT-Ag_80_3, respectivamente. Na Fig. 4.19d pode ser observado que os incrementos obtidos da viscosidade nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$), foram em média 0,63%, 0,90% e 1,28% para as amostras OT-CNT_800_1, OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente. Mesmo não sendo incrementos representativos na viscosidade das amostras de nanofluido, devido que a maioria dos resultados estão dentro da faixa incerteza do equipamento, pode ser visualizada uma tendência de aumento desta propriedade como a

adição de nanopartículas. Por outro lado, quando comparados os resultados da viscosidade relativa das amostras de nanofluido de maior concentração, de igual tamanho e morfologia de nanopartícula, e com diferente fluido base, (Ag_80_3 e OT-Ag_80_3) e (CNT_800_4 e OT-CNT_800_3), pode ser observado que a amostra CNT_800_4 apresentou um incremento de viscosidade dinâmica, em média de 7,0% quando comparado com a amostra OT-CNT_800_3, cujo valor foi em média de 0,57%.

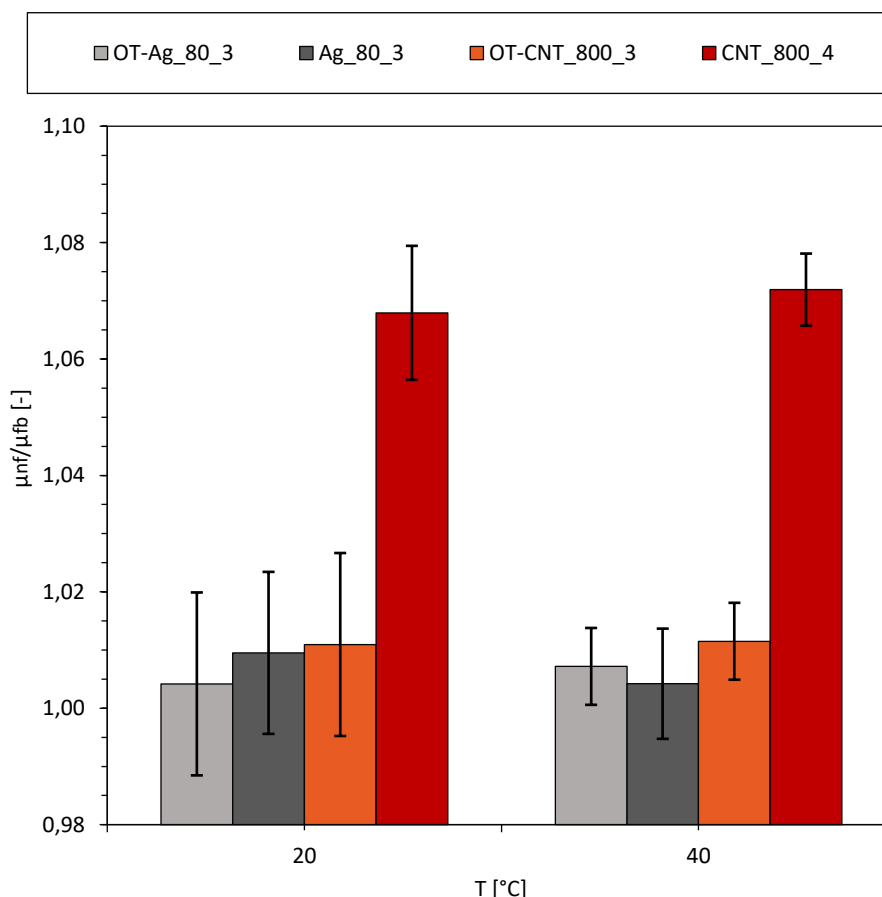


Figura 4.20 – Viscosidade dinâmica relativa em função da temperatura das amostras de nanofluidos a base de óleo térmico (OT-100) e da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) com os mesmos tipos de nanopartícula e na maior concentração volumétrica.

Portanto, poderia ser interpretado que existe uma influência do fluido base, porém, este efeito não foi observado nas amostras de nanofluido de prata, (Ag_80_3 e OT-Ag_80_3). Este comportamento pode estar relacionado indiretamente à forma da nanopartícula, já que, nas amostras de nanofluido de maior concentração em volume de nanopartícula, adotando o critério de (TIMOFEEVA, ROUTBORT e SINGH, 2009) descrito anteriormente na seção 4.2.4, a forma do nanotubo de carbono dificulta o movimento livre das partículas pelas interações entre elas. No entanto, os efeitos das interações de nanopartículas podem ter sido minimizados devido ao valor elevado da viscosidade dinâmica do óleo térmico (OT-100).

Nesse sentido, os incrementos na viscosidade dinâmica na amostra OT-CNT_800_3 não foram influenciados ou intensificados pela forma da nanopartícula, como sim foi atribuído na amostra de nanofluido CNT_800_4 a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) onde a viscosidade dinâmica é quase 100 vezes menor que a do óleo térmico (OT-100), favorecendo as interações de nanopartículas.

4.4. Transferência de calor por convecção dos nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%)

Uma vez que foi validada a bancada experimental, foi possível realizar as campanhas de experimentos e adquirindo os dados necessários para determinar o coeficiente de transferência de calor e a queda de pressão, que são parâmetros indispensáveis na avaliação do desempenho termo-hidráulico das amostras de nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) e óleo térmico (OT-100). Os experimentos foram realizados conforme as condições operacionais descritas na Tab. 4.3. Portanto, para cada amostra de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), foram realizados 24 experimentos, sendo realizados, um total de 504 experimentos, para todas as amostras produzidas com este fluido base. Para as amostras de nanofluido a base de óleo térmico, foram realizados 3 experimentos, sendo realizados, um total de 18 experimentos, para todas as amostras produzidas a base de (OT-100).

Tabela 4.3 - Variação dos parâmetros operacionais de ensaio

Fluidos	$T_{entrada}$ [°C]	$q''_{s.t.}$ [W/m ²]	\dot{m} [g/s]	Regime
Nanofluidos a base de H ₂ O:EG 50:50 wt%	15	≈10000	20 e 25	Laminar (T _{ent} =25 °C)
			25 e 30	Laminar (T _{ent} =15 °C)
	25	≈18000	65	Turbulento
			70	Turbulento
			75	Turbulento
			80	Turbulento
	45	≈10000	11	Laminar
			17	Laminar
			23	Laminar

Posteriormente, são apresentados resultados da comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido e o próprio fluido base. Também são mostradas as comparações da queda de pressão e o fator de atrito das amostras testadas com o fluido base, com uma avaliação do desempenho termo-hidráulico das amostras de nanofluido testadas no equipamento experimental, e finalmente são apresentados os modelos matemáticos propostos que descrevem o comportamento das propriedades termofísicas dos nanofluidos obtidas experimentalmente (condutividade térmica, massa específica e viscosidade dinâmica) e modelos matemáticos que descrevem o comportamento da transferência de calor dos nanofluidos testados.

4.4.1. Coeficiente de transferência de calor por convecção

As Figs. 4.21a e 4.21c apresentam os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, $h_{exp}[W/m^2\text{°C}]$, em função da variação da velocidade mássica, $G[kg/sm^2]$ para as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%). Assim, os resultados experimentais ilustrados na Fig.4.21a, mostraram que o coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 20 nm foram em média, 3,7%, 5,6% e 7,3% maiores ao do fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%), para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste os incrementos foram em média 3,8%, 4,3% e 8,8%, para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente.

Na Fig.4.21c, os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 80 nm foram em média, 7,2%, 6,9% e 14,4% para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste os incrementos foram em média 8,3%, 8,4% e 14,5%, para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente. Nesse sentido, para as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80, não foi observado um efeito evidente da temperatura no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor nas condições nominais que foram realizados os testes.

Por outro lado, as Fig. 4.21b e 4.21d apresentam os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%). Portanto, os resultados experimentais apresentados na Fig.4.21b mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido Ag_20 não apresentaram incrementos no

coeficiente de transferência de calor médio, sendo observado apenas um leve incremento de 0,9% para amostra de maior concentração (Ag_20_1). No entanto, os incrementos do coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, foram em média de, 3,8%, 4,8% e 8,1%, para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente.

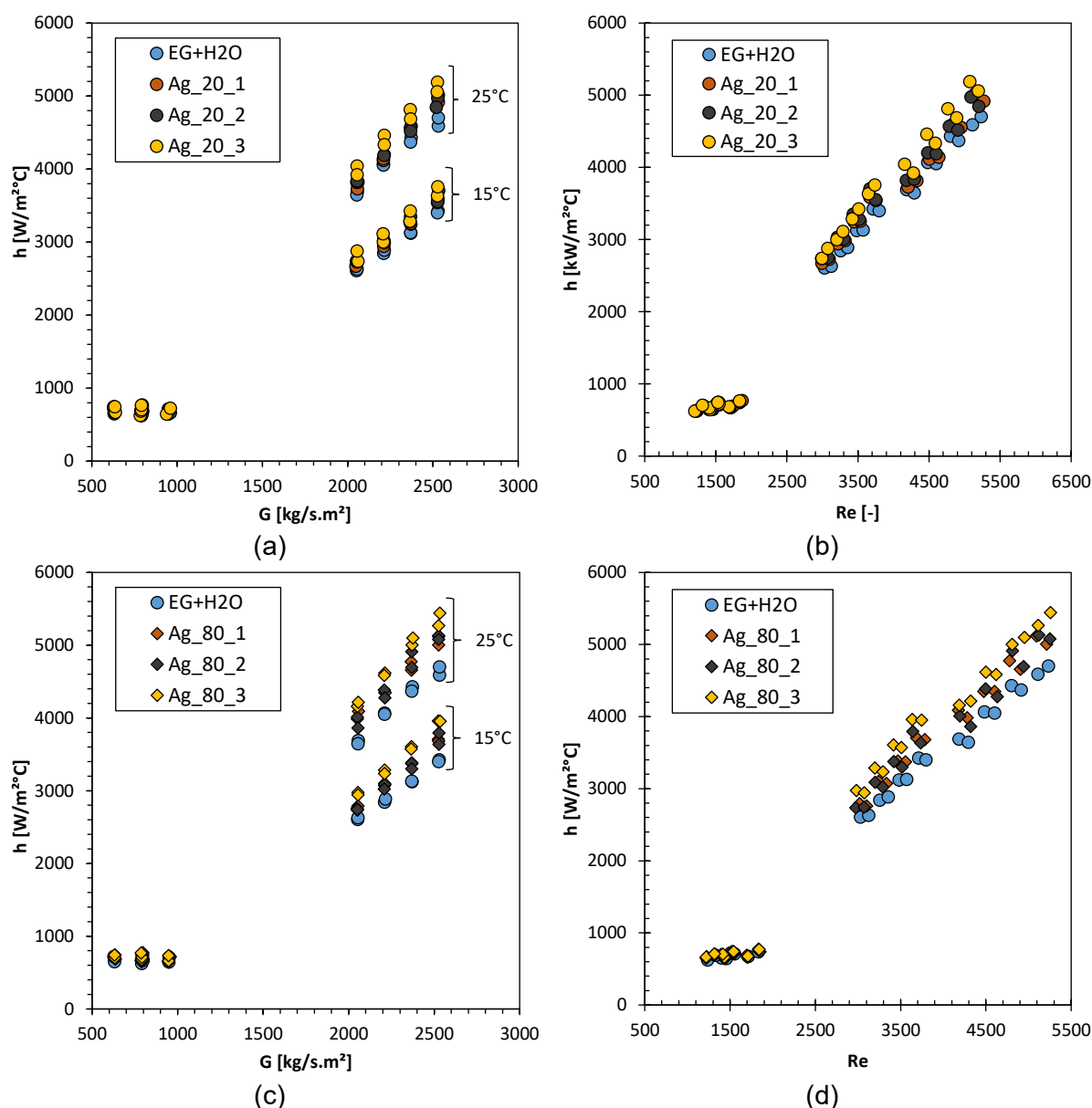


Figura 4.21 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostra de nanofluido de prata. (a) Ag_20 ($h_{exp} \times G$). (b) Ag_20 ($h_{exp} \times Re$). (c) Ag_80 ($h_{exp} \times G$). (d) Ag_80 ($h_{exp} \times Re$).

Os resultados da Fig.4.21d mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido Ag_80 apresentaram uma tendência de incremento no coeficiente de transferência de calor médio de 1,3%, 1,1% e 3,8%, para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente. Os incrementos do coeficiente de transferência de calor em regime turbulento foram em média de, 7,9%, 7,5% e 14,4%, para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e

Ag_80_3, respectivamente. Consequentemente, das Figs. 4.21b e 4.21d, pode ser observado o efeito da adição de nanopartícula no incremento do coeficiente de transferência de calor em regime turbulento. É importante destacar que foram observados maiores incrementos nas amostras de nanofluido Ag_80 quando comparados com incrementos obtidos nas amostras Ag_20 na mesma concentração volumétrica de nanopartícula. Este comportamento, pode ser atribuído incrementos na condutividade térmica obtidos para as amostras de nanofluido de prata, os quais mostraram uma influência do tamanho da nanopartícula conforme descrito na seção 4.2.3.

A Fig. 4.22a apresenta os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, $h_{exp}[W/m^2\text{°C}]$, em função da variação da velocidade mássica, $G[kg/sm^2]$, para as amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3). Assim, os resultados experimentais ilustrados na Fig.4.22a, mostraram uma tendência de incrementos do coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste foram em média, 3,1%, 3,0% e 3,2% maiores ao do fluido base, para as amostras $Al_2O_3_1$, $Al_2O_3_2$ e $Al_2O_3_3$, respectivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste a tendência de incrementos foram em média 1,8%, 1,7% e 1,6%, para as amostras $Al_2O_3_1$, $Al_2O_3_2$ e $Al_2O_3_3$, respectivamente. Portanto, nas amostras de nanofluido de alumina, foi observado um efeito da temperatura no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor nas condições nominais que foram realizados os testes, no entanto, este efeito está associado à degradação das amostras de nanofluido de alumina durante a realização dos testes de transferência de calor, uma vez que, os testes realizados de gravimetria nas amostras após realizados os testes na bancada experimental mostraram uma diminuição da concentração volumétrica de 72%, para a amostra de maior concentração ($Al_2O_3_3$)

A Fig. 4.22b apresenta os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, $h_{exp}[W/m^2\text{°C}]$ em função do número de Reynolds, Re . Os resultados experimentais mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido (Al_2O_3) não apresentaram incrementos no coeficiente de transferência de calor médio, quando comparado com o fluido base. Os resultados descritos na Fig. 4.22b mostram que em regime turbulento as amostras de alumina (Al_2O_3) apresentaram uma tendência de incremento no coeficiente de transferência de calor, em média de, 2,5%, 2,4% e 2,4%, para as amostras $Al_2O_3_1$, $Al_2O_3_2$ e $Al_2O_3_3$, respectivamente. Portanto, dos resultados ilustrados na Fig. 4.22 pode ser inferido que não foi visualizado o efeito da adição de nanopartícula no incremento do coeficiente de transferência de calor. Este comportamento poder ser também associando a deposição de nanopartícula a superfície interna do circuito de teste da bancada por causa das instabilidades

das amostras. Uma vez que, as amostras de nanofluido de maior concentração de nanopartículas sem algum tipo de tratamentos superficial ou sem auxílio de surfactante favorecem às aglomerações de nanopartículas, conformando aglomerados de maior tamanho que facilitam à sedimentação. Nesse sentido, quando o nanofluido permanece em escoamento dentro da bancada experimental, a contração de nanopartícula tende a ser afetada nas amostras de nanofluido de maior concentração volumétrica, dado que, somente as nanopartículas ou às aglomerações de nanopartícula de menor tamanho permanecem estáveis dentro do fluido base.

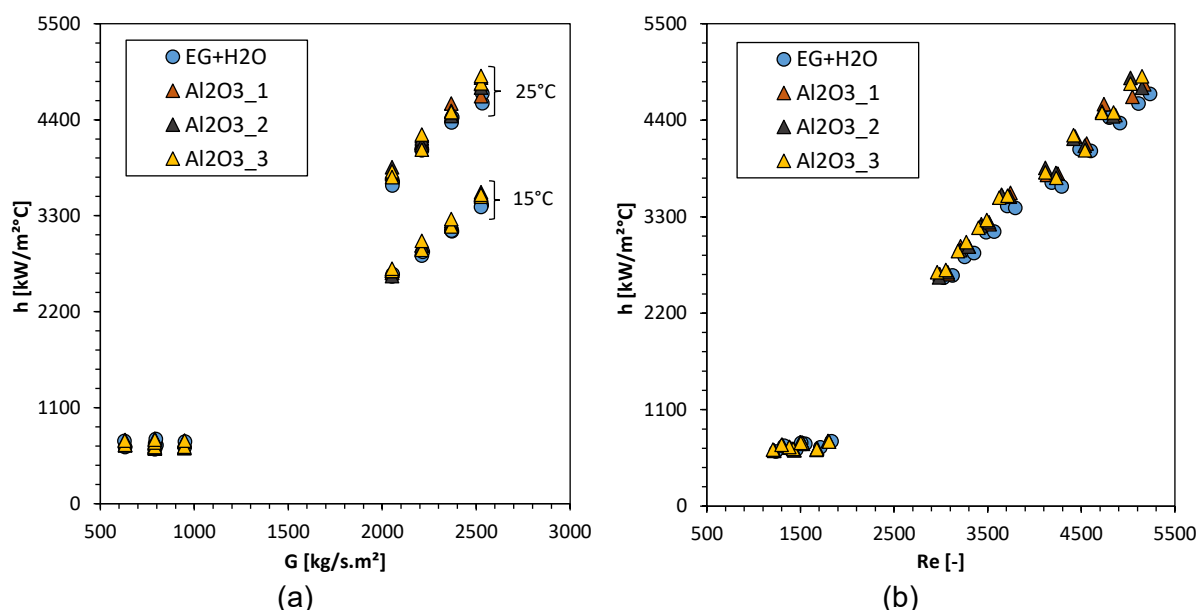


Figura 4.22 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido de alumina (Al₂O₃), (a) ($h_{exp} \times G$). (b) ($h_{exp} \times Re$).

As Figs. 4.23a e 4.23c apresentam os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função da variação da velocidade mássica, para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%). Conforme, os resultados experimentais ilustrados na Fig.4.23a, foi observado que os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=800$), quando comparado ao fluido base (H₂O:EG 50:50 wt%), foram em média de, 3,3%, 4,1% e 8,3%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste os incrementos foram em média de 3,2%, 3,6%, e 9,7%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. A amostra CNT_800_1 não apresentou aumento no coeficiente de transferência de calor nas duas temperaturas de entrada que foram realizados os testes.

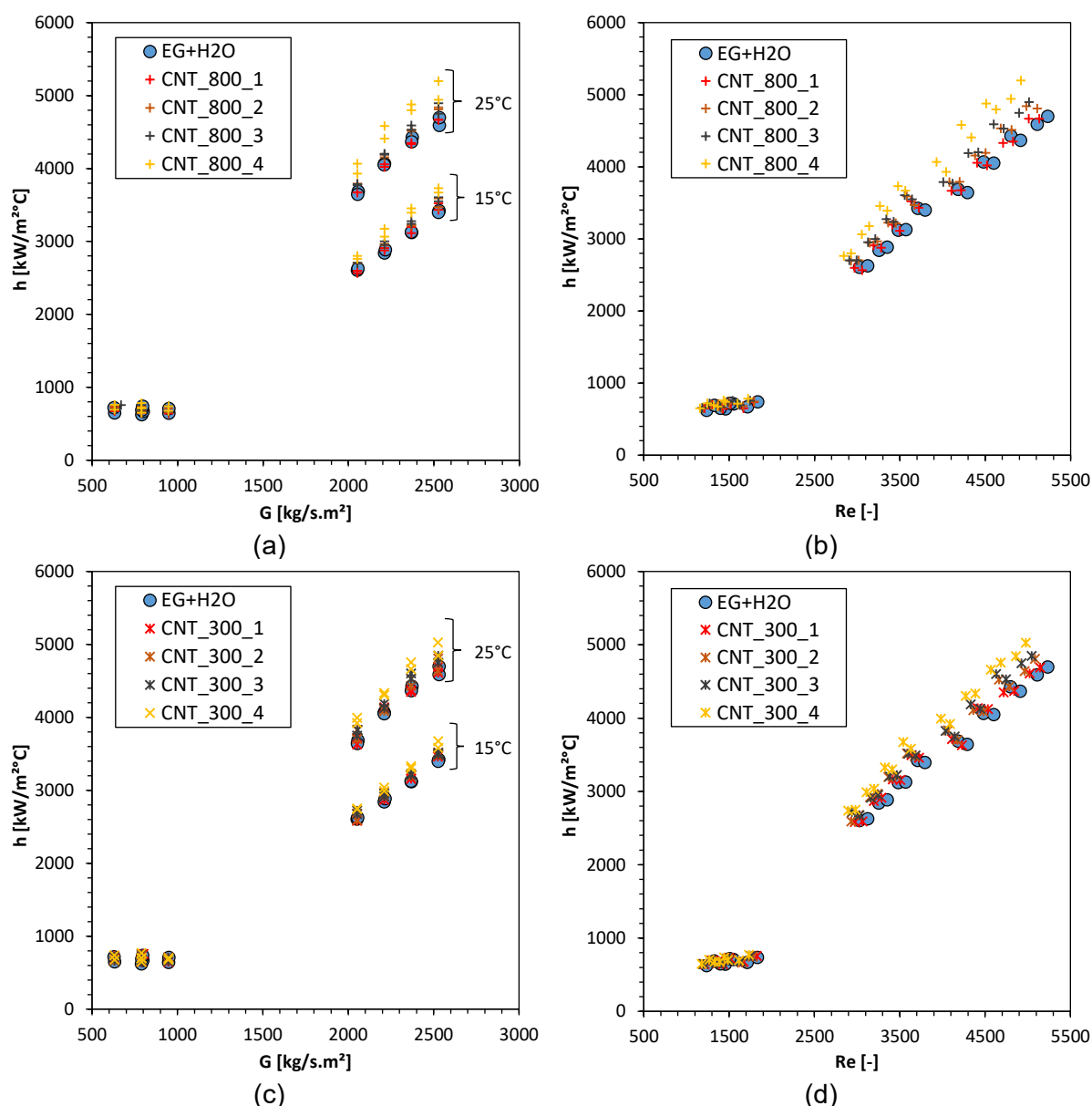


Figura 4.23 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800 ($h_{exp} \times G$). (b) CNT_800 ($h_{exp} \times Re$). (c) CNT_300 ($h_{exp} \times G$). (d) CNT_300 ($h_{exp} \times Re$).

Na Fig.4.23c, os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto ($r=l/d=300$), foram em média de, 2,2%, 2,8% e 5,7%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste, os incrementos foram em média de, 1,9%, 3,2% e 6,9%, para as amostras, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente. A amostra CNT_300_1, também não apresentou aumento no coeficiente de transferência de calor nas duas temperaturas de entrada que foram realizados os testes. Assim, de acordo com as Figs. 4.23a e 4.23c não foi

observado um efeito da temperatura no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor para as amostras de nanofluido de nanotubo CNT_800 e CNT_300, nas condições nominais que foram realizados os testes.

As Fig. 4.23b e 4.23d apresentam os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%). Portanto, os resultados experimentais apresentados na Fig.4.23b mostraram que em regime laminar, nas amostras de nanofluido CNT_800 o coeficiente de transferência de calor médio quando comparado com o fluido base, aumentou em média, 2,3%, 2,8% e 3,1% para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. Em regime turbulento, os aumentos do coeficiente de transferência de calor, foram em média de, 3,3%, 3,8% e 9,1%, para as amostras CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente.

Os resultados da Fig.4.23d mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido CNT_300 apresentaram uma tendência de incremento no coeficiente de transferência de calor médio de, 1,2%, 1,3% e 1,5%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente. Os incrementos do coeficiente de transferência de calor em regime turbulento foram em média de, 2,0%, 3,0% e 6,3%, para as amostras CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente. Vale ressaltar que, nas amostras de nanofluido de menor concentração CNT_800_1 e CNT_300_1, não foi observado aumento no coeficiente de transferência de calor quando comparado com o fluido base.

Nesse sentido, nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) pode ser observado um possível efeito da adição de nanopartícula no aumento do coeficiente de transferência de calor em regime laminar e turbulento. Por outro lado, as amostras de nanofluido CNT_800 apresentaram maiores incrementos no coeficiente de transferência de calor regime laminar e turbulento quando comparados com incrementos observados nas amostras CNT_300 na mesma concentração volumétrica de nanopartícula.

A Fig. 4.24a apresenta os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção em função da variação da velocidade mássica, para as amostras de nanofluido de diamante (DO). Portanto, conforme os resultados experimentais mostrados na Fig.4.24a, podem ser observados que os incrementos no coeficiente de transferência de calor, em regime turbulento, foram em média, 3,6%, 8,8%, 12,4% e 5,9% quando comparados ao fluido base, para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4, respectivamente, na condição de temperatura de 15 °C na entrada na seção de teste. Na condição de temperatura de 25 °C na entrada na seção de teste os incrementos foram em média de, 3,7%, 9,7%, 12,5%, e 6,3% para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4, respectivamente. Portanto, nas amostras de

nanofluido de diamante, não foi observado um efeito da temperatura no incremento relativo do coeficiente de transferência de calor nas condições nominais que foram realizados os testes.

A Fig. 4.24b apresenta os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção em função do número de Reynolds. Os resultados experimentais mostraram que em regime laminar, as amostras de nanofluido (DO) apresentaram incrementos no coeficiente de transferência de calor em média de, 2,7%, 5,5%, 6,9% e 4,8%, para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4, respectivamente, quando comparado ao fluido base.

Os resultados descritos na Fig. 4.24b mostram que em regime turbulento as amostras de nanofluido de diamante (DO) apresentaram aumentos no coeficiente de transferência de calor, em média de, 3,6%, 9,2%, 12,4% e 6,0%, para as amostras DO_1, DO_2, DO_3 e DO_4, respectivamente.

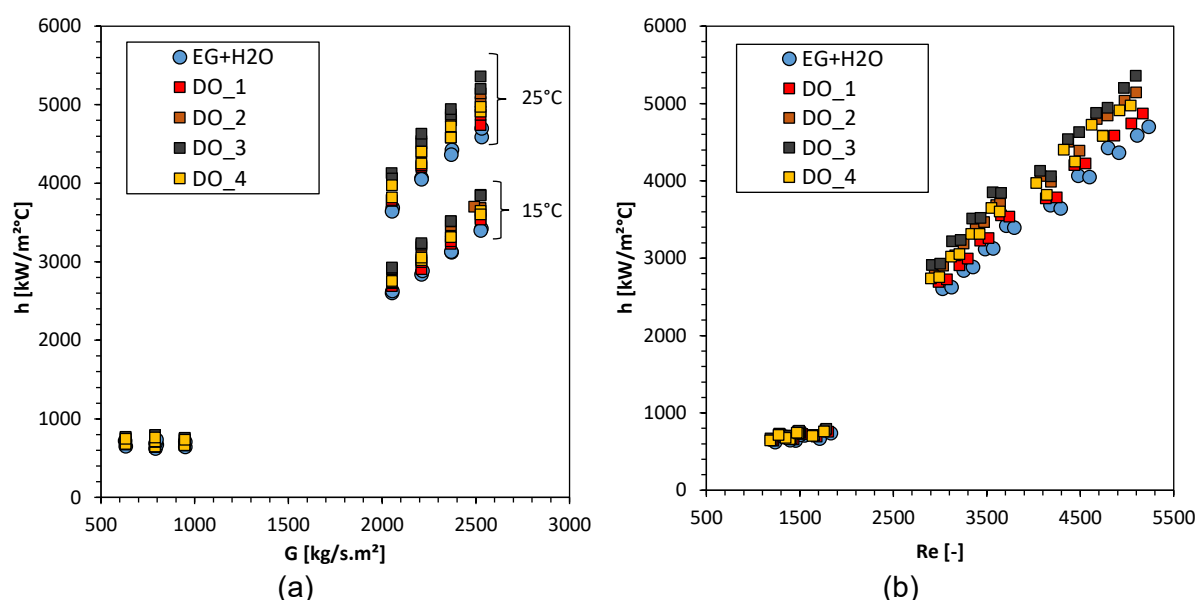


Figura 4.24 - Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido de diamante (DO), (a) $(h_{exp} \times G)$. (b) $(h_{exp} \times Re)$.

Portanto, de acordo com os resultados apresentados na Fig. 4.2a pode ser visualizado o efeito da adição de nanopartícula no incremento do coeficiente de transferência de calor. No entanto, para amostra de maior concentração de nanopartícula de diamante, DO_4, o incremento observado no coeficiente de transferência de calor foi menor que aqueles observados nas amostras de concentração intermediária, DO_2 e DO_3. Este comportamento não pode ser atribuído a um efeito de degradação da amostra DO_4 por causa da deposição de nanopartícula a superfície interna do circuito de teste da bancada, dado que, o teste de gravimetria da amostra DO_4 após realizados os testes na bancada experimental mostrou uma diminuição de 28% na concentração volumétrica. Nesse sentido, a amostra DO_4 cuja

concentração volumétrica foi de 0,0486% após produzida conforme descrito na tab. 3.3 mudou para 0,035%, possuindo ainda uma concentração volumétrica superior às concentrações intermediárias (DO_2 e DO_3), razão pela qual a causa pode estar associada algum efeito de concentração ótima que modificou as características de interação das nanopartículas com as moléculas do fluido base, conseqüentemente modificando as características da transferência de calor de quantidade de movimento.

4.4.2. Análise da transferência de calor, utilizando os valores médios dos testes realizados

Com o objetivo de avaliar a magnitude da transferência de calor de transferência de calor por convecção é realizada uma comparação em termos adimensionais, que apresenta o número Nusselt médio para todas amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), e para o próprio fluido base em função do número de Reynolds, Re, para escoamento laminar na região de desenvolvimento e escoamento turbulento plenamente desenvolvido, com a média dos resultados entre os experimentos realizados com fluxo de calor de 10 kW/m² e 18 kW/m² para cada vazão mássica de cada fluido testado. Assim, as condições nominais que caracterizam a média dos resultados com fluxo de calor equivalente de 14 kW/m² são descritas a seguir na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros nominais que caracterizam a média dos resultados

Fluidos	$T_{entrada}$ [°C]	$q''_{S.T.}$ [W/m²]	\dot{m} [g/s]	Regime
Nanofluidos a base de H ₂ O:EG 50:50 wt%	15	≈14000	20 e 25	Laminar (T _{ent} =25 °C)
			25 e 30	Laminar (T _{ent} =15 °C)
	65		Turbulento	
	70		Turbulento	
	75		Turbulento	
	80		Turbulento	

Nesse sentido, as Fig. 4.25a, 4.25b, apresentam o número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80, respectivamente. Pode ser observado que o número de Nusselt em regime turbulento nas amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 não apresentou diferenças significativas quando comparado ao fluido base. No entanto, em regime laminar o número de Nusselt médio nos nanofluidos de prata Ag_20 apresentaram uma diminuição em média de, 1,7%, 4,0% e 6,6%, para as amostras Ag_20_1, Ag_20_2 e Ag_20_3, respectivamente, e nos nanofluidos

Ag_80 apresentaram uma diminuição em média de, 3,8%, 7,4% e 9,4%, para as amostras Ag_80_1, Ag_80_2 e Ag_80_3, respectivamente.

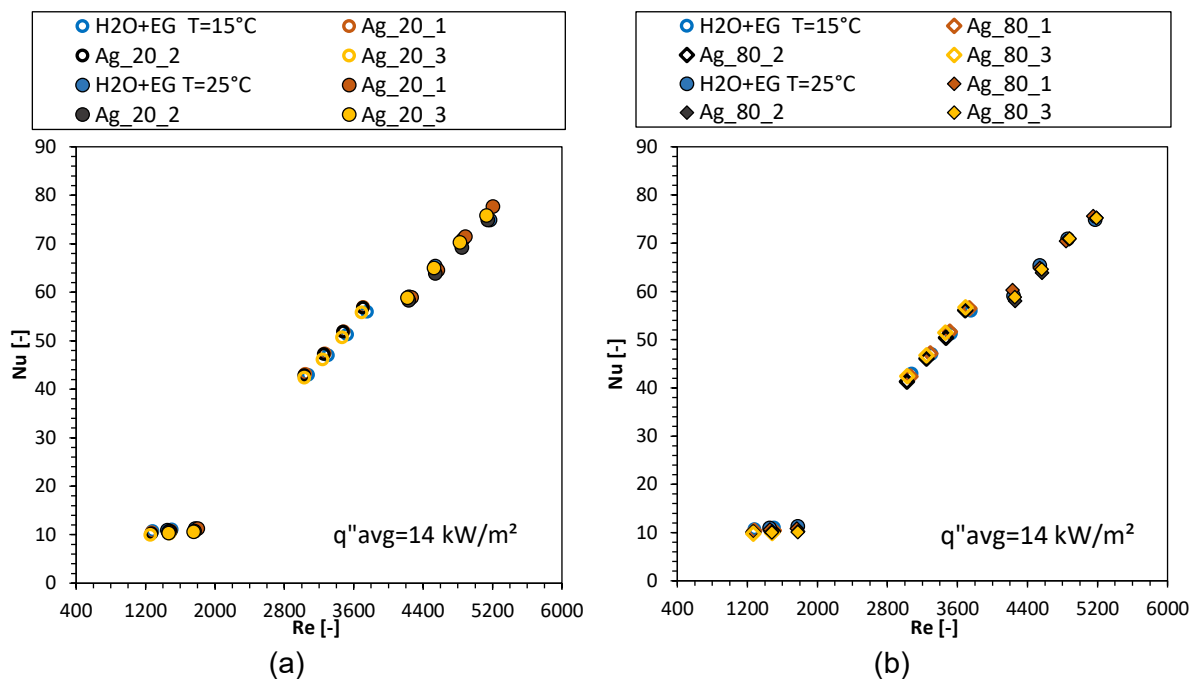


Figura 4.25 – Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de prata. (a) Ag_20. (b) Ag_80.

A Fig. 4.26 apresenta o número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3).

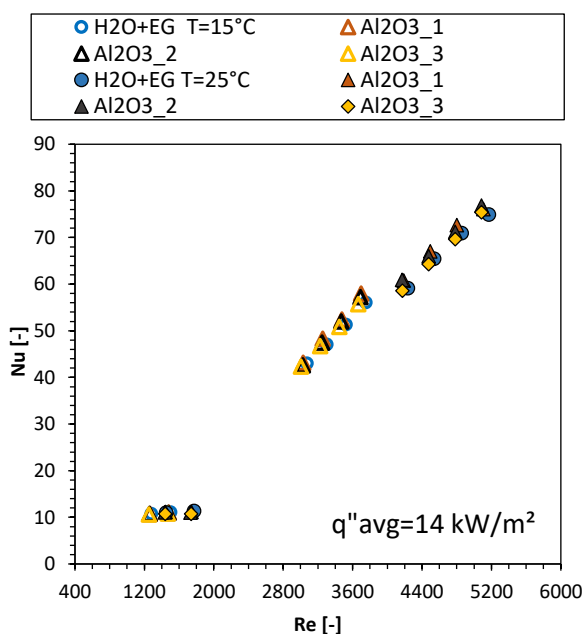


Figura 4.26 – Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de alumina (Al_2O_3).

Portanto, pode-se afirmar que para regime turbulento o número de Nusselt nas amostras de nanofluido de alumina não foram observadas diferenças significativas quando comparado com o fluido base. Por outro lado, em regime laminar o número de Nusselt médio nos nanofluidos de alumina apresentaram uma diminuição em média de, 0,3%, 0,8% e 2,8%, para as amostras Al_2O_3_1 , Al_2O_3_2 e Al_2O_3_3 , respectivamente.

As Fig. 4.27a, 4.27b, apresentam o número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono, CNT_800 e CNT_300, respectivamente. Assim, pode ser observado que o número de Nusselt em regime turbulento das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono, CNT_800 e CNT_300, apresentaram uma tendência de incremento com a adição de nanopartícula. No entanto, é importante destacar que o parâmetro de referência da variação de escoamento na realização dos testes de transferência de calor na bancada experimental foi a vazão mássica. Nesse sentido, o número de Nusselt médio não apresentou variações com referência ao fluido base, utilizando como parâmetro de comparação a vazão mássica.

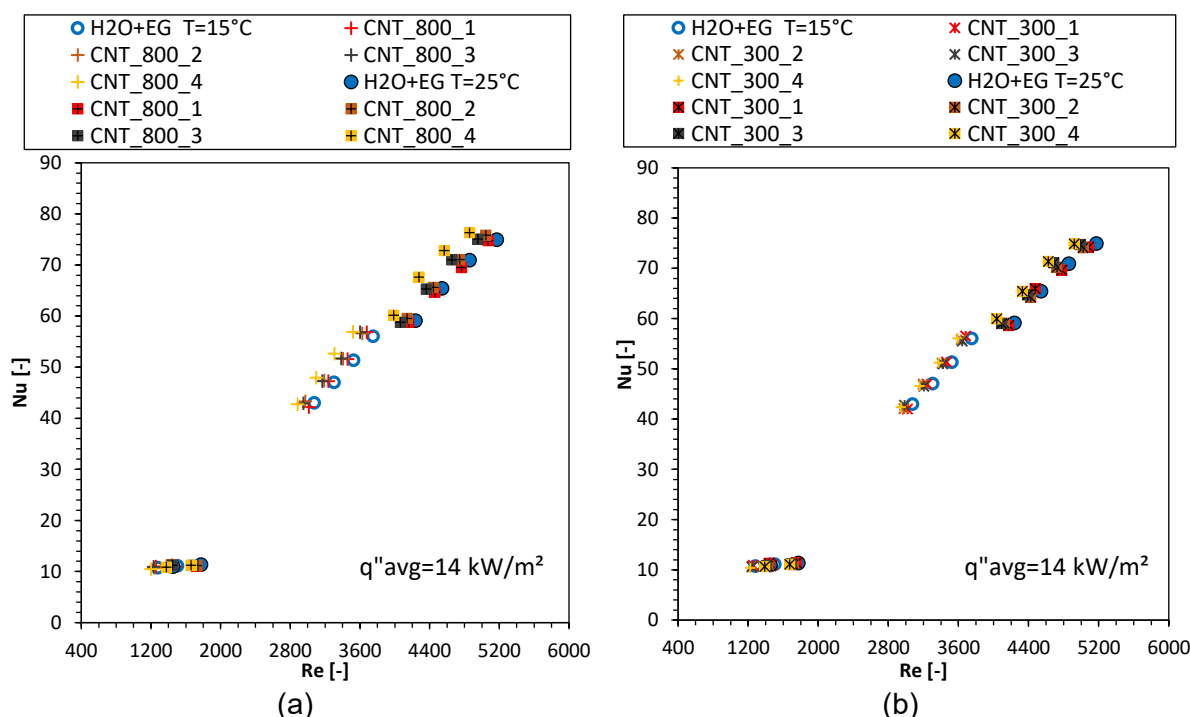


Figura 4.27 - Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800. (b) CNT_300.

No entanto, em regime laminar o número de Nusselt médio nos nanofluidos de nanotubo, CNT_800, apresentaram uma diminuição em média de, 0,2%, 0,4%, 0,7% e 1,6%, para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. O número de Nusselt médio nos nanofluidos de nanotubo, CNT_300, apresentaram uma

diminuição em média de, 0,4%, 1,8%, 1,9% e 3,1% para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente.

A Fig. 4.28 apresentam o número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de diamante (DO). Pode ser observado que em regime turbulento as amostras de nanofluido o número de Nusselt apresentou a mesma tendência de incremento com a adição de nanopartículas que nas amostras de nanotubo de carbono, CNT_800 e CNT_300. No entanto, diferente das amostras de nanotubo de carbono, o número de Nusselt médio nas amostras de diamante apresentaram aumentos em média de, 2,6%, 5,8%, 7,5% para as amostras DO_1, DO_2 e DO_3, respectivamente, quando comparados ao fluido base, utilizando como parâmetro de referencia a vazão mássica do experimento. A amostras DO_4 não apresentou variações no número de Nusselt quando comparado ao fluido base na mesma vazão mássica.

Em regime laminar o número de Nusselt médio nas amostras DO_1, DO_2 e DO_3 não apresentaram diferenças significativas, quando comparado ao fluido base. No entanto, a amostra DO_4 apresentou uma diminuição de 2,7%.

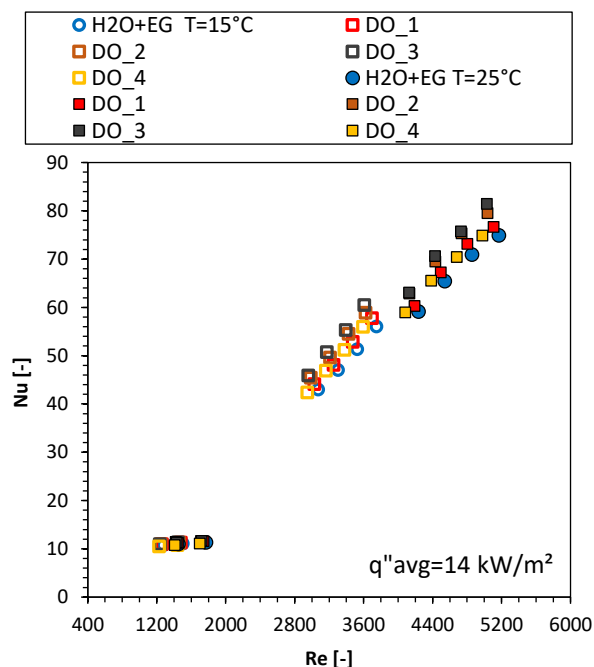


Figura 4.28 - Número de Nusselt médio em função do número de Reynolds das amostras de nanofluido de diamante (DO).

4.5. Transferência de calor por convecção dos nanofluidos a base de (OT-100)

4.5.1. Coeficiente de transferência de calor por convecção

As Figs. 4.29a e 4.29c apresentam os resultados para o coeficiente de transferência de calor por convecção, $h_{exp}[W/m^2\text{°C}]$, em função da variação da velocidade mássica, $G[kg/sm^2]$ para as amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80 e nanotubo de carbono OT-CNT_800 a base de óleo térmico OT-100. Os resultados experimentais ilustrados na Fig.4.21a, mostraram que o coeficiente de transferência de calor, em regime laminar, na condição de temperatura de 45 °C na entrada na seção de teste para as amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 80 nm foram em média, 2,1%, 2,6% e 2,3% maiores ao do fluido base (OT-100), para as amostras OT-Ag_80_1, OT-Ag_80_2 e OT-Ag_80_3, respectivamente. Na Fig.4.29c, os incrementos no coeficiente de transferência de calor, para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono com partículas de razão de aspecto ($r=l/d=800$), foram em média, 3,6%, 7,1% e 7,6% para as amostras OT-CNT_800_1, OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente.

As Figs. 4.29b e 4.29d apresentam os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800 a base de óleo térmico OT-100. Portanto, nos resultados experimentais apresentados na Fig.4.29d foi observado que as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono apresentaram maiores com aumento do número de Reynolds. Nesse sentido, para o maior número de Reynolds testado no equipamento experimental foram obtidos incrementos da ordem de 5,7%, 12,5%, e 13,3% para as amostras OT-CNT_800_1, OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente. No entanto, este comportamento não foi completamente evidente nos resultados das amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80 apresentadas na Fig.4.29b, dado que, os incrementos obtidos no coeficiente de transferência de calor para o maior número de Reynolds foram da ordem de 3,7%, 4,2%, e 2,7% para as amostras OT-Ag_80_1, OT-Ag_80_2 e OT-Ag_80_3, respectivamente, destacando que na amostra OT-Ag_80_3 o incremento do coeficiente de transferência de calor na condição intermedia de número de Reynolds foi 1,4% superior à condição de maior número de Reynolds.

Por outro lado, na Fig. 4.29, pode ser observado o efeito da adição de nanopartícula no incremento do coeficiente de transferência de calor. Cabe destacar que foram observados maiores incrementos nas amostras de nanofluido OT-CNT_800 quando comparados com incrementos obtidos nas amostras OT-Ag_80 na mesma concentração volumétrica de

nanopartícula. Este comportamento, pode ser atribuído a incrementos na condutividade térmica obtidos para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono, os quais mostraram uma influência da forma da nanopartícula e da funcionalização conforme descrito na seção 4.3.3.

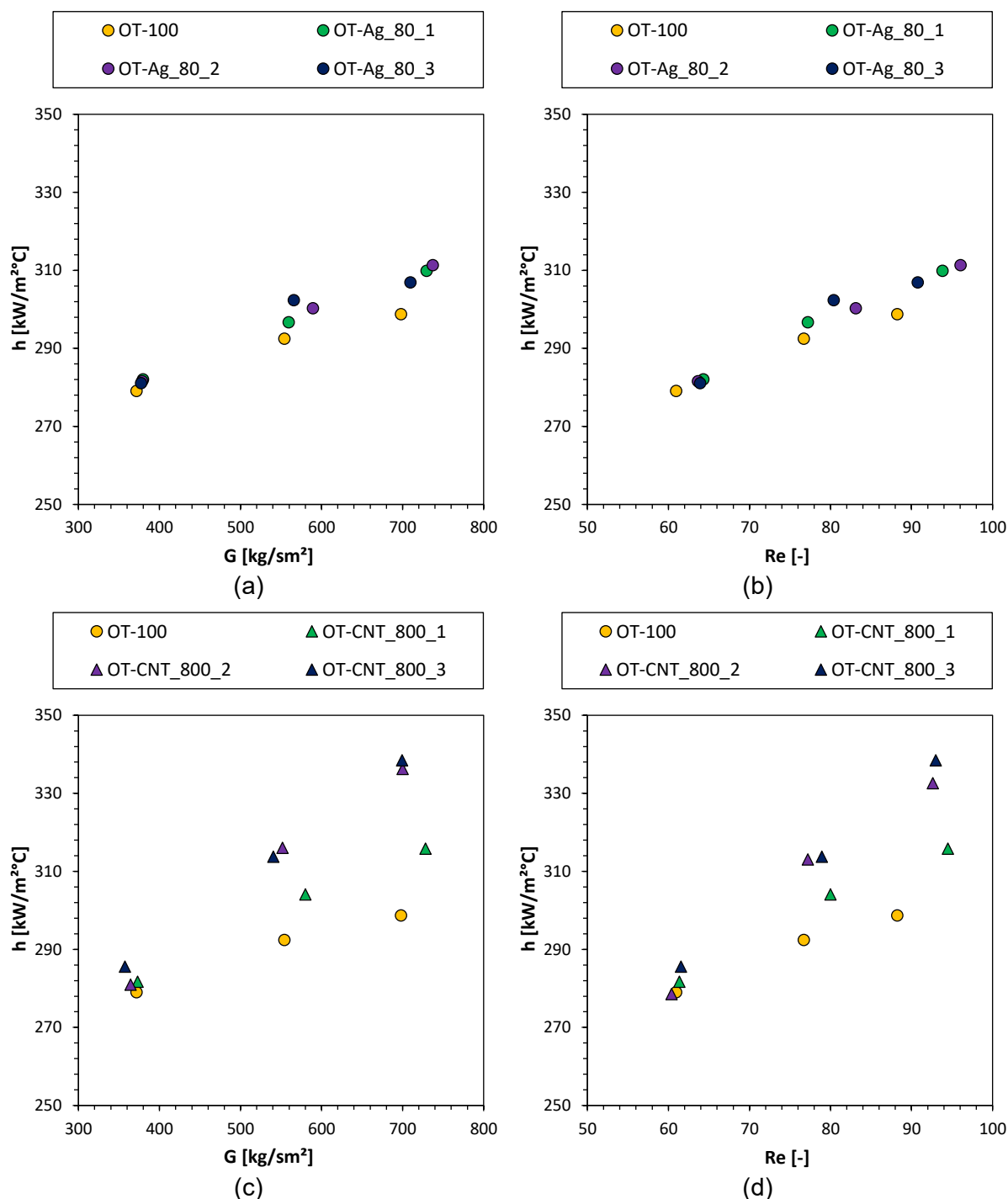


Figura 4.29 -Resultados obtidos experimentalmente do coeficiente de transferência de calor por convecção para as amostra de nanofluido a base de óleo térmico. (a) OT-Ag_80

$(h_{exp} \times G)$. (b) OT-Ag_80 $(h_{exp} \times Re)$. (c) OT-CNT_800 $(h_{exp} \times G)$. (d) OT-CNT_800 $(h_{exp} \times Re)$.

4.6. Queda de pressão e fator de atrito dos nanofluidos

4.6.1. Queda de pressão e fator de atrito das amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%)

As Figs. 4.30a e 4.30c apresentam os resultados para a queda de pressão na seção de teste, em função da variação da velocidade mássica, $G[kg/sm^2]$ para as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%). Assim, os resultados experimentais ilustrados na Figs.4.30a e 4,30c, mostram que em regime turbulento as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 não apresentaram diferenças significativas na queda de pressão na seção de teste, quando comparado ao fluido base. No entanto em regime laminar as amostras de nanofluido de prata apresentaram leves incrementos na queda de pressão na seção de teste menores que 2,0%

As Fig. 4.30b e 4.30d apresentam os resultados experimentais do fator de atrito, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de prata Ag_20 e Ag_80 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%), comparados como os modelos descritos nas Eqs. 3.6 e 3.7, para escoamento em regime laminar na região de desenvolvimento e escoamento em regime turbulento plenamente desenvolvido respectivamente. Portanto, os resultados experimentais apresentados na Figs. 4.30b e 4.30d mostram que em regime laminar, todas as amostras de nanofluido, Ag_20 e Ag_80, apresentaram um desvio médio de 22%. com o modelo teórico. No entanto, em regime turbulento o desvio médio observado entre o modelo de referência (Petukhov) e os dado experimentais foi em média de 1,8% e 2,5%, para as amostras Ag_20 e Ag_80, respectivamente.

Na Fig. 4.31a podem ser observados os resultados para a queda de pressão na seção de teste, em função da variação da velocidade mássica para as amostras de nanofluido de alumina (Al₂O₃). Portanto, a que queda de pressão da seção de testes nas amostras de alumina (Al₂O₃) apresentou comportamento semelhantes às amostras de prata, dado que não foram observados incrementos significativos quando comparado ao fluido base em regime turbulento. No entanto, em regime laminar os incrementos observados para as amostras de alumina foram em média de 1,2%.

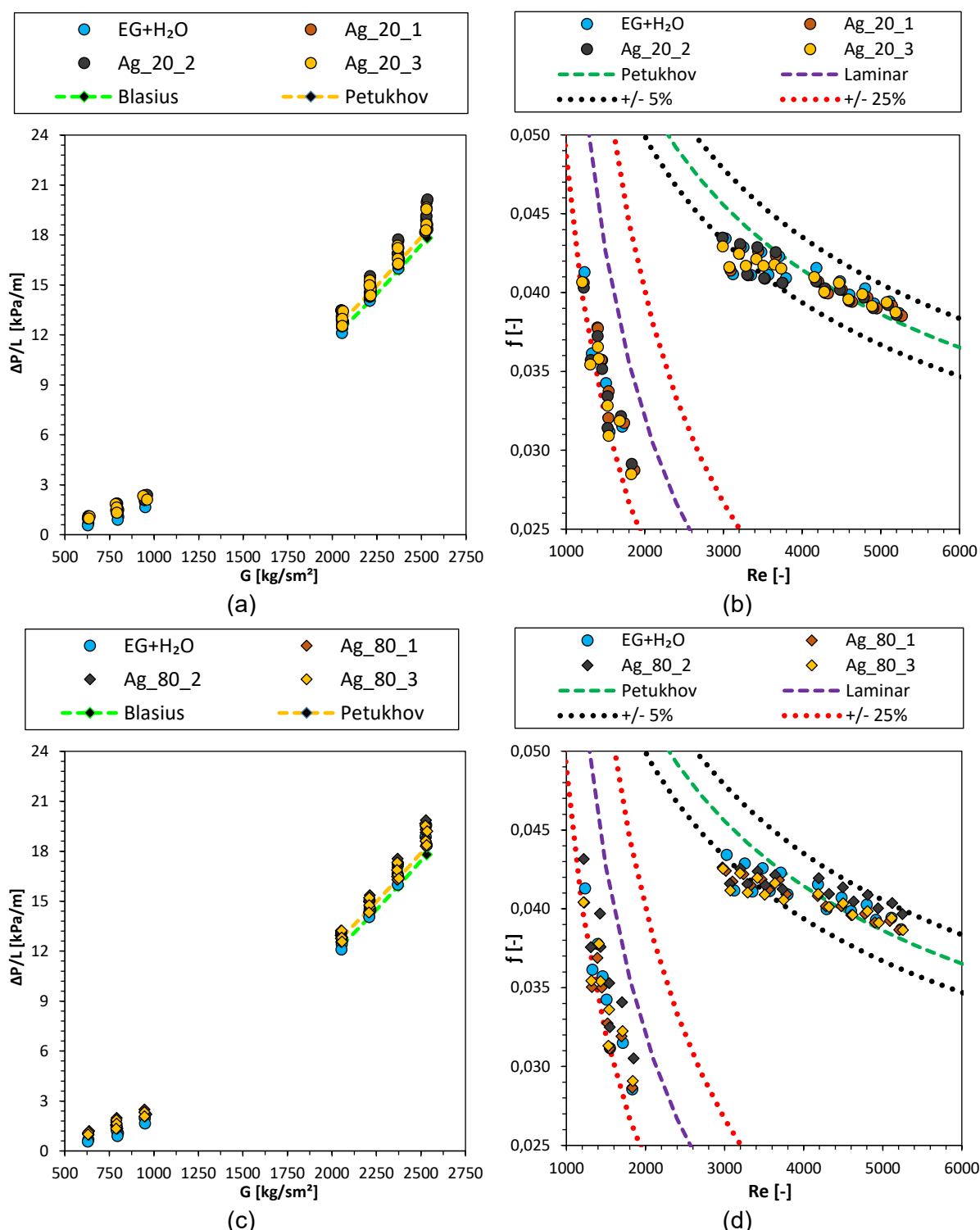


Figura 4.30 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de prata. (a) Ag₂₀ ($\Delta P/L \times G$). (b) Ag₂₀ ($f \times Re$). (c) Ag₈₀ ($\Delta P/L \times G$). (d) Ag₈₀ ($f \times Re$).

As Fig. 4.31b apresentam os resultados experimentais do fator de atrito, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de alumina comparados como os resultados modelos descritos nas Eqs. 3.6 e 3.7, para escoamento em regime laminar e turbulento respectivamente. Assim pode ser observado que em regime laminar, todas as

amostras de nanofluido alumina apresentaram um desvio médio com o modelo teórico em média de 20%. Em regime turbulento o desvio médio observado entre o modelo de referência (Petukhov) e os dados experimentais foi em média de 1,9%.

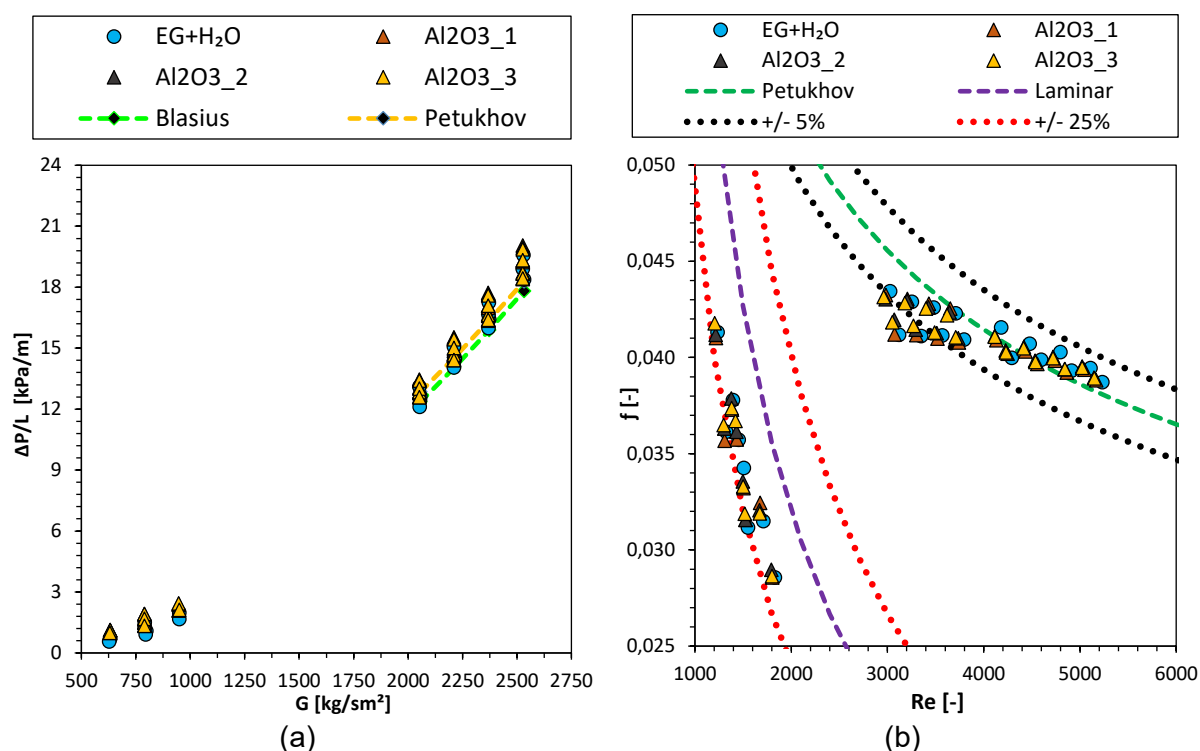


Figura 4.31 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de alumina (Al₂O₃). (a) ($\Delta P/L \times G$). (b) ($f \times Re$).

As Figs. 4.32a e 4.32c apresentam os resultados para a queda de pressão na seção de teste, em função da variação da velocidade mássica, G [kg/sm²] para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de (H₂O:EG 50:50 wt%). Os resultados experimentais apresentados na Fig.4.32a mostram que em regime turbulento as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 apresentaram incrementos da queda de pressão em média de, 0,4%, 1,0%, 1,2% e 1,3%, para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente. Em regime laminar os incrementos na queda de pressão na seção de teste foram em média de, 0,9%, 1,9%, 2,3% e 2,8%, para as amostras CNT_800_1, CNT_800_2, CNT_800_3 e CNT_800_4, respectivamente.

Na 4,32c os incrementos da queda de pressão na seção de teste em regime turbulento para as amostras de nanotubo CNT_300 foram em média de, 1,0%, 1,9%, 2,0% e 2,1% para as amostras CNT_300, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente, quando comparado ao fluido base. No entanto, em regime laminar os incrementos na queda de

pressão na seção de teste foram em média de, 2,6%, 3,8%, 4,2% e 5,7%, para as amostras CNT_300_1, CNT_300_2, CNT_300_3 e CNT_300_4, respectivamente.

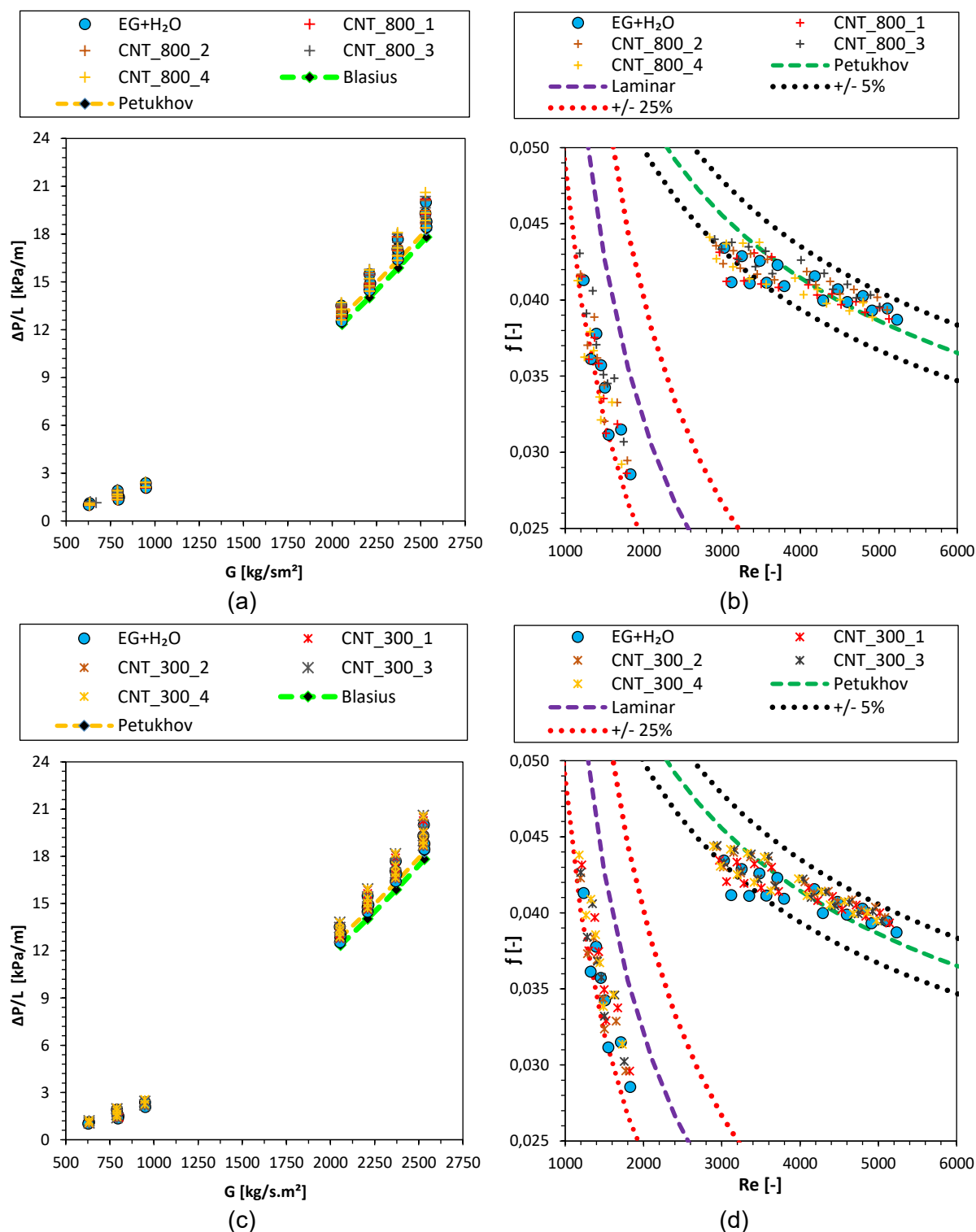


Figura 4.32 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) CNT_800 ($\Delta P/L \times G$). (b) CNT_800 ($f \times Re$). (c) CNT_300 ($\Delta P/L \times G$). (d) CNT_300 ($f \times Re$).

As Fig. 4.32b e 4.32d apresentam os resultados experimentais do fator de atrito, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono CNT_800 e CNT_300 a base da mistura de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%), comparados como os modelos descritos nas Eqs. 3.6 e 3.7, para escoamento em regime laminar e turbulento respectivamente. Portanto, conforme os resultados ilustrados na Figs.4.32b e 4.32d, pode ser observado que em regime laminar, todas as amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300 apresentaram um desvio médio com o modelo teórico em média de 21%. No entanto, em regime turbulento os desvios médios observado entre o modelo de referência (Petukhov) e os dados experimentais foi em média de 1,8% e 0,5% para as amostras de nanofluido CNT_800 e CNT_300, respectivamente.

Na Fig. 4.33a podem ser observados os resultados para a queda de pressão na seção de teste, em função da variação da velocidade mássica para as amostras de nanofluido de alumina (DO). Assim, não foram observados incrementos significativos na queda de pressão da seção de testes nas amostras três amostras de menor concentração volumétrica de nanopartícula (DO_1, DO_2 e DO_3). No entanto, a amostra de maior concentração apresentou um aumento na queda de pressão em média de, 2,4%, quando comparada ao fluido base. Em regime laminar foi observada uma diminuição na potência bombeamento de em média de 0,9%, 1,6% e 1,8% nas amostras DO_1, DO_2 e DO_3, no entanto, para a amostra DO_4 foi observado um incremento de 1,8%.

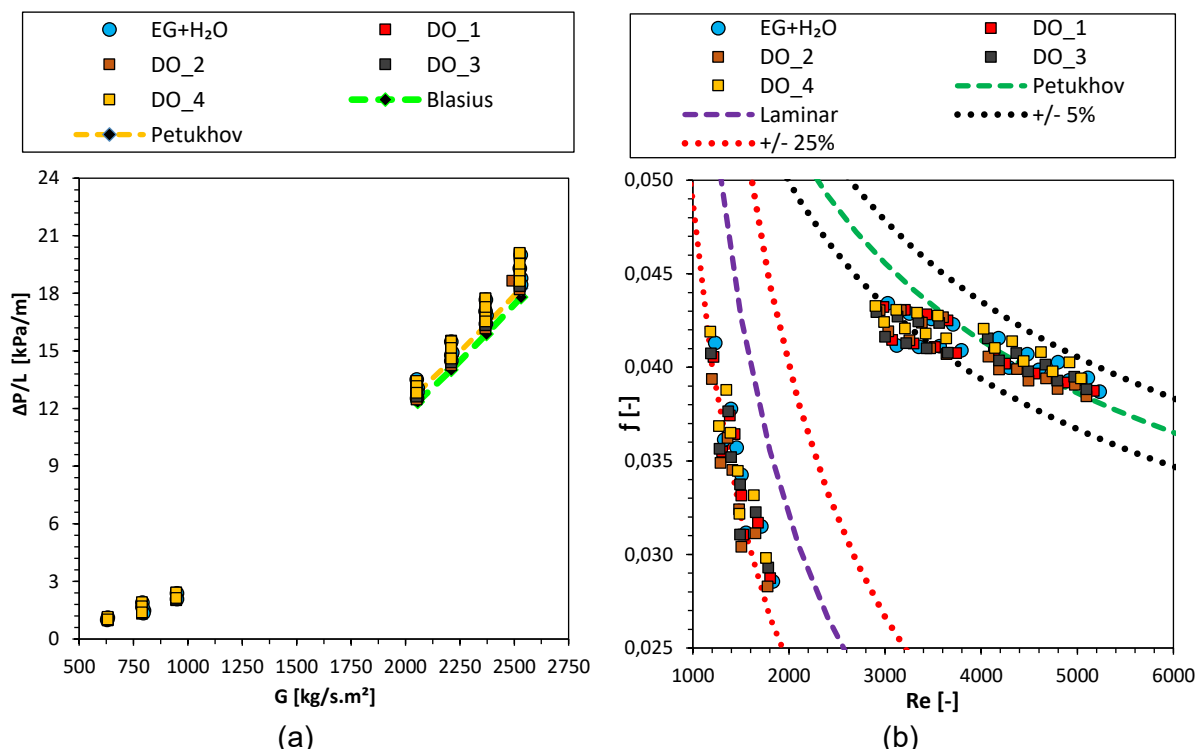


Figura 4.33 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de diamante (DO).

(a) ($\Delta P/L \times G$). (b) ($f \times Re$).

Na Fig. 4.33b pode ser observado que em regime laminar, todas as amostras de nanofluido diamante apresentaram um desvio médio de 22% com o modelo teórico descrito na Eq. 3.6. Em regime turbulento o desvio médio observado entre o modelo de referência (Petukhov) e os dados experimentais foi em média de 2.1%.

4.6.2. Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100)

As Figs. 4.34a e 4.34c apresentam os resultados para a queda de pressão na seção de teste, em função da variação da velocidade mássica, $G[kg/sm^2]$ para as amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80 e OT-CNT_800 a base de óleo térmico OT-100. Assim, os resultados experimentais ilustrados na Figs.4.30a mostram que em regime laminar as amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80 apresentaram incrementos pouco significativos na queda de pressão na seção de teste, quando comparado ao fluido base. Portanto, para as amostras de nanofluido de prata com partículas de diâmetro de 80 nm os incrementos foram em média, 3,6%, para a amostra OT-Ag_80_1, de 2,8%, para OT-Ag_80_2 e de 1%, para OT-Ag_80_3. Assim, pode ser observada um efeito da adição de nanopartícula em óleo térmico OT-100 favorece à redução da queda de pressão em escoamento laminar.

Este comportamento pode ser também visualizado na Fig. 4,30c, que apresenta os resultados da queda de pressão para as amostras de nanofluido de nanotubo de carbono OT-CNT_800, dado que, quando comparado ao fluido base foram observados decrementos da queda de pressão em média de 2,1% e 6,58% para as amostras OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente. A amostra OT-CNT_800_1, apresentou um leve incremento de 0,8%. No entanto, foi evidenciado que adição de nanopartícula em óleo térmico favorece à redução da queda de pressão. Este efeito, pode estar associado à possibilidade dos nanofluidos a base de óleo térmico ter apresentado alguma característica de comportamento de fluido não newtoniano que modificou a viscosidade em função da tensão de cisalhamento.

As Fig. 4.34b e 4.34d apresentam os resultados experimentais do fator de atrito, em função do número de Reynolds, Re , para as amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80 e nanotubo de carbono OT-CNT_800 a base de óleo térmico OT-100, comparados como os modelo descrito na Eqs. 3.6 para escoamento em regime laminar. Portanto, pode ser observado que os resultados experimentais mostram que em regime laminar, o fluido base e as amostras de nanofluido, OT-Ag_80 e OT-CNT_800, apresentaram desvios em média de 33%, 32% e 33% com o modelo teórico.

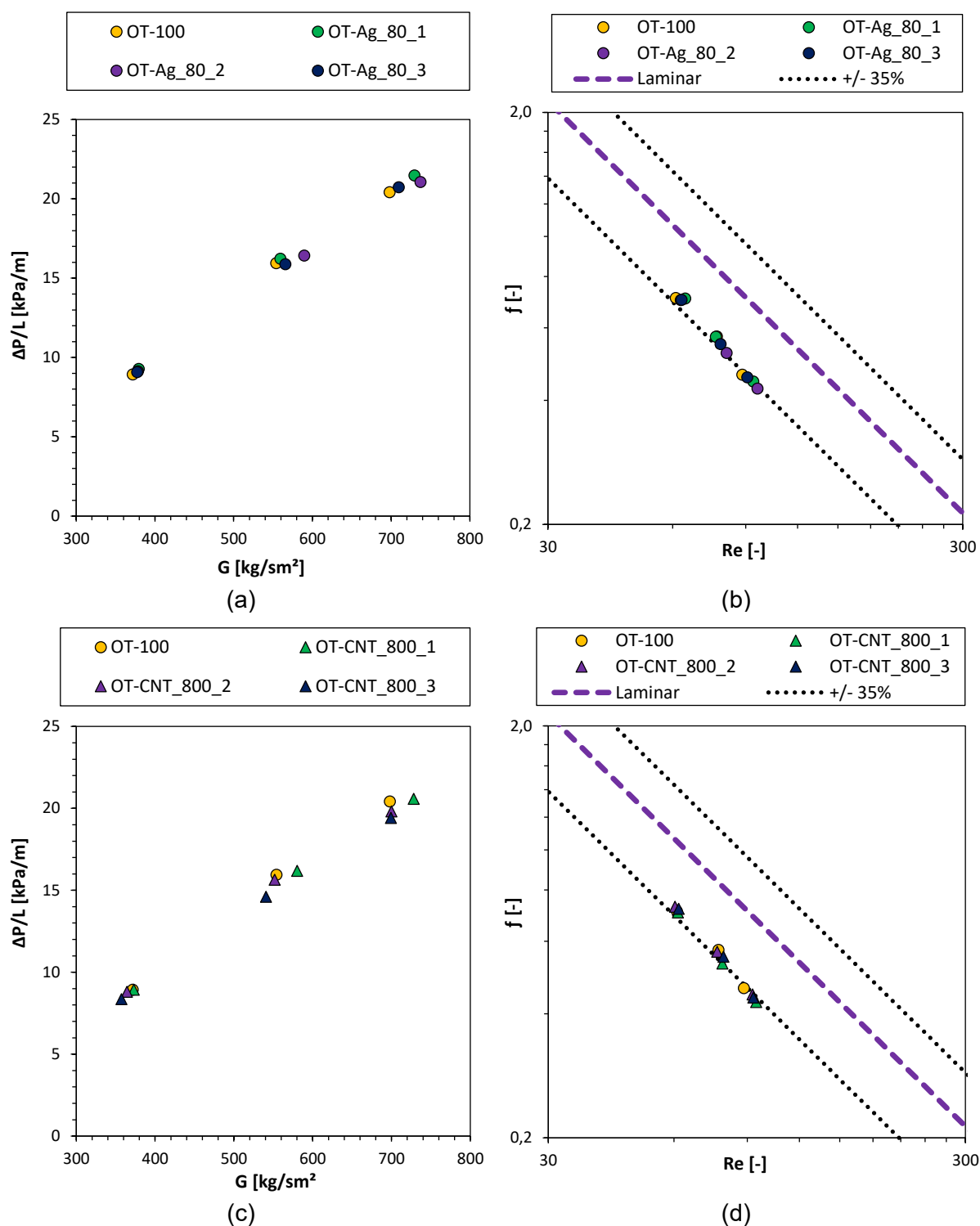


Figura 4.34 - Queda de pressão e fator de atrito das mostras de nanofluido de nanotubo de carbono. (a) OT-Ag_80 ($\Delta P/L \times G$). (b) OT-Ag_80 ($f \times Re$). (c) OT-CNT_800 ($\Delta P/L \times G$). (d) OT-CNT_800 ($f \times Re$).

4.7. Desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos

4.7.1. Amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%)

Autores como (PRASHER, SONG, *et al.*, 2006b), (WILLIAMS, BUONGIORNO e HU, 2008) e (TIMOFEEVA, ROUTBORT e SINGH, 2009) concordaram que os nanofluidos podem apresentar benefícios no desempenho térmico de um sistema, sempre e quando exista um adequado equilíbrio entre o aumento da condutividade térmica e o incremento da viscosidade.

Para Pak e Cho (1998), o método de comparação baseado no número de Reynolds não é geralmente o melhor método de comparação, uma vez que a viscosidade do nanofluido é superior a do fluido base. (MEYER, MCKRELL e GROTE, 2013) afirmaram que as comparações realizadas com o mesmo número de Reynolds sugerem que qualquer fluido com uma viscosidade maior, apresentem coeficientes de transferência de calor mais elevados e podem estar sendo avaliados tendenciosamente como fluidos refrigerantes promissores.

Autores como Haghighi, *et al.* (2014) e (HAGHIGHI, UTOMO, *et al.*, 2015) consideram que além da grande dependência e propriedades termofísicas do nanofluido no desempenho termo-hidráulico, muitas pesquisas apresentam resultados que podem ser tendenciosos para os leitores, dado que, não são adotados critérios de comparação objetivos, como acontece quando é somente comparado o coeficiente de transferência de calor com o número de Reynolds. Isto é, que da definição do número de Reynolds, Re , é evidente que para um fluido de maior viscosidade a velocidade de escoamento deve ser maior para manter o mesmo número de Re de fluidos menor viscosidade. portanto, uma maior velocidade de escoamento junto a uma maior viscosidade do fluido, tem como consequência uma maior queda de pressão que favorece diretamente ao aumento da potência de bombeamento. Nesse sentido, os referidos autores propõem como método de comparação a potência de bombeamento, uma vez que são considerados tanto a transferência de calor como a queda de pressão do nanofluido.

Nesse sentido, para descrever o desempenho termo-hidráulico de todas as amostras de nanofluidos testados foi estabelecida uma comparação que especifica o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção em função da potência de bombeamento relativa. É importante ressaltar que os testes térmicos e hidráulicos foram realizados simultaneamente. Assim, a potência de bombeamento consumida na seção de teste foi calculada por intermédio da Eq. 4.1, tanto para todas das amostras de nanofluido ensaiadas como para o fluido base, nas mesmas condições nominais descritas na Tab. 4.3. Ou seja, mesma vazão mássica, igual temperatura de entrada e igual fluxo de calor imposto na seção de teste. Os resultados obtidos

para as amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), Ag_20, Ag_80, Al₂O₃, CNT_800, CNT_300 e DO são apresentados nas Figs. 4.35a, 4.35b, 4.35c, 4.35d, 4.35e e 4.35f, respectivamente.

$$\frac{\dot{V}}{\rho} \quad (4.1)$$

Pode ser observado nas figuras que existem quatro quadrantes que poderiam descrever o desempenho termo-hidráulico de qualquer dispersão, sendo “m” o coeficiente relativo de transferência de calor de calor e “n” a potência de bombeamento relativa em coordenadas vetoriais, onde a coordenada (1,1) representa o fluido base utilizado na dispersão. O primeiro quadrante (m>1, n>1) descreve um desempenho termo-hidráulico esperado dos nanofluidos, onde existe um incremento no coeficiente de transferência de calor por convecção e um incremento na potência de bombeamento; o segundo quadrante (m<1, n>1) e o terceiro quadrante (m<1, n<1) representam a redução da queda de pressão uma vez que a potência de bombeamento depende desta grandeza, sendo na maioria dos casos maior para o nanofluido. No entanto, segundo e terceiro quadrante indicam incrementos e decrementos no coeficiente de transferência de calor respectivamente. O quarto quadrante (m>1, n<1) indica que a aplicação de nanofluidos não apresenta nenhuma vantagem, já que este quadrante representa valores na potência de bombeamento superiores aos do fluido base e coeficientes de transferência de calor inferiores aos do fluido base para as mesmas condições nominais.

Devido aos baixos incrementos na queda pressão das amostras de nanofluido, não foram observados aumentos significativos na potência de bombeamento nas amostras de nanofluido testadas na bancada, como pode ser observado na Fig. 4.35. No entanto, nas amostras de nanofluido de nanotubo de carbono (CNT_800 e CNT_300) pode ser observada uma tendência de aumento na potência de bombeamento dos nanofluidos com a adição de nanopartícula nanopartícula. Na Fig. 4.35 também pode ser observado o efeito da adição de nanopartículas no coeficiente de transferência de calor. Portanto, adotando o critério estabelecido para quantificar a potencialidade de aplicação dos nanofluidos a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em função do desempenho termo-hidráulico, a amostra de nanofluido de prata de maior concentração, Ag_80_3, a amostra de maior concentração de nanofluido de nanotubo de carbono com razão de aspecto (r=l/d=800), CNT_800_4 e as amostras de concentrações intermediárias de diamante, DO_2 e DO_3, foram as que apresentaram o melhor desempenho termo-hidráulico, dado que, apresentaram incrementos próximos ou maiores que 10% no coeficiente de transferência de calor por convecção.

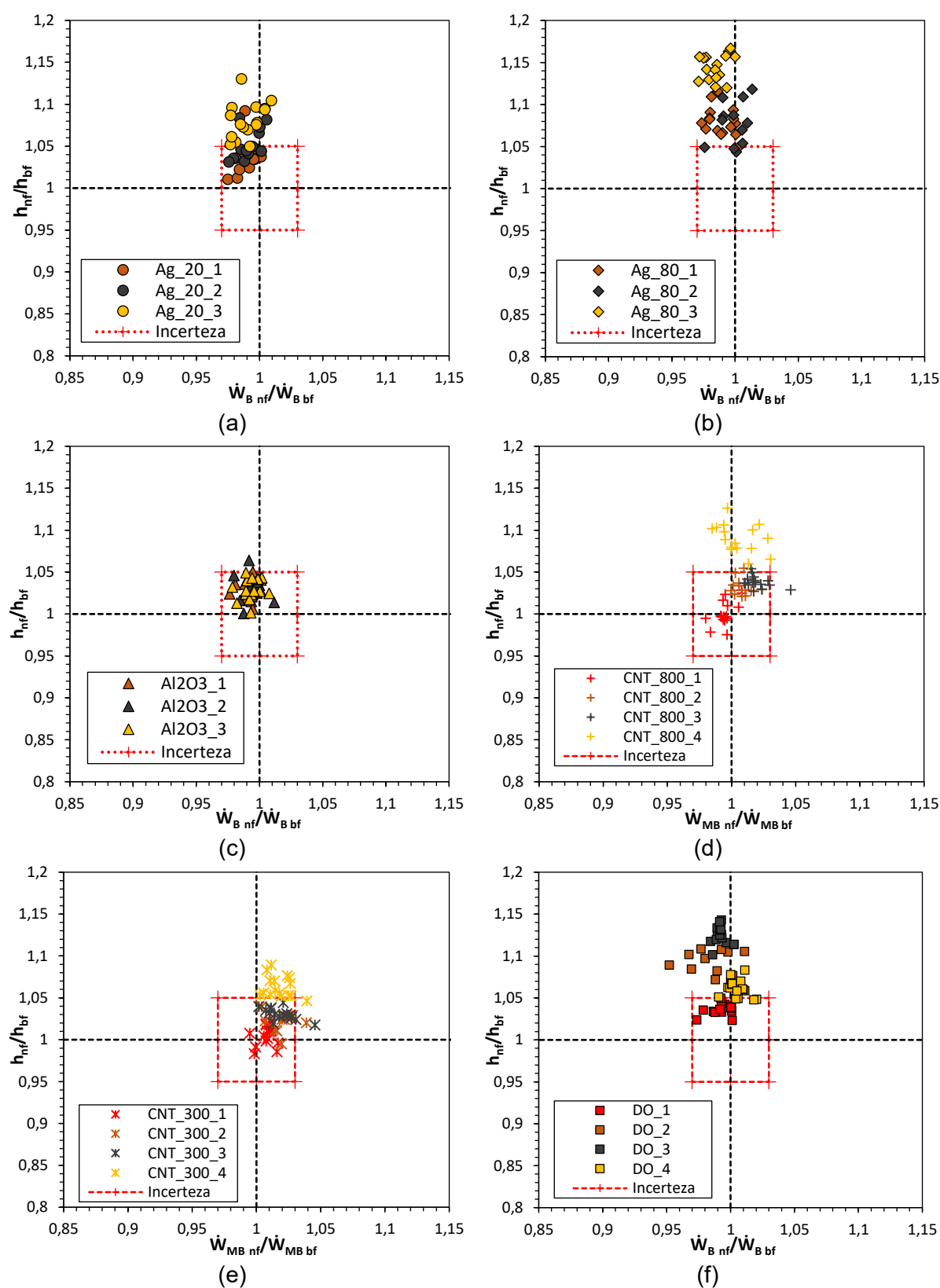


Figura 4.35 - Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção $[h_{nf}/h_{bf}]$ em função da potência de bombeamento relativa $[\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,bf}]$. (a) Ag_20. (b) Ag_80. (c) Al₂O₃. (d) CNT_800. (e) CNT_300. (f) DO.

4.7.2. Amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100)

Adotando o critério estabelecido para quantificar a potencialidade de aplicação dos nanofluidos descrito na seção de 4.7.1, são apresentados os resultados experimentais para o desempenho termo-hidráulico nas amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100) na Fig. 4.36. Assim, as Fig. 4.36a e 4.36b apresentam os resultados para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$] para as amostras de nanofluido OT-Ag_80 e OT-CNT_800, respectivamente.

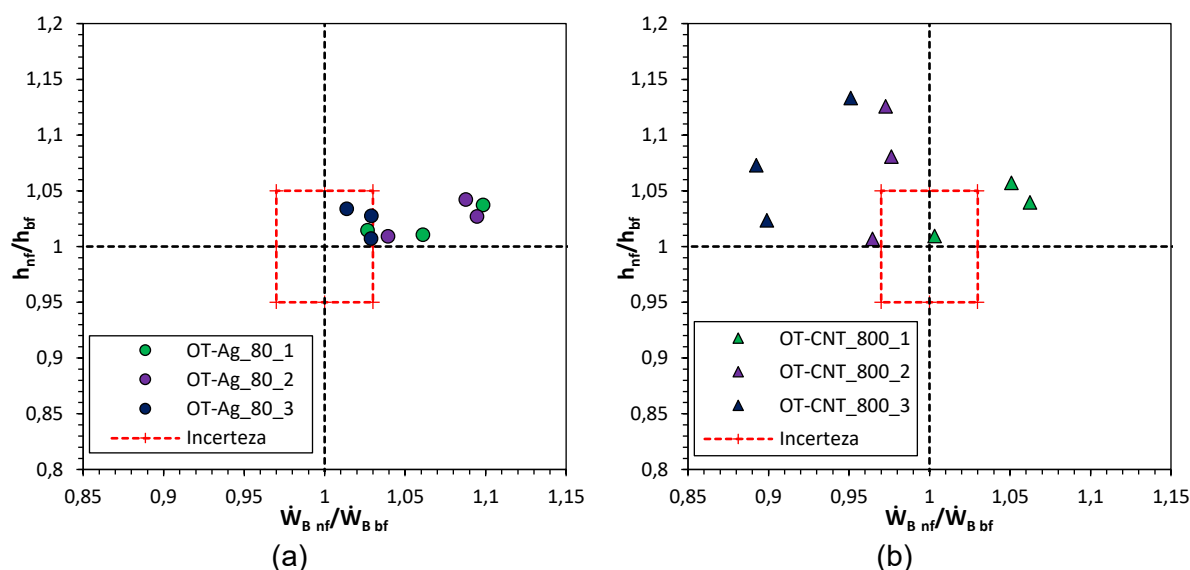


Figura 4.36 - Resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção [h_{nf}/h_{fb}] em função da potência de bombeamento relativa [$\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$]. (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800.

Na Fig. 4.36a, pode ser observado que as amostras de nanofluido OT-Ag_80 não apresentaram incrementos significativos no coeficiente de transferência de calor, e os incrementos na potência de bombeamento foram em média de 6,8%, 6,9% e 2,4% para as amostras OT-Ag_80_1, OT-Ag_80_2 e OT-Ag_80_3, respectivamente. Consequentemente, as amostras de nanofluido OT-Ag_80 não apresentaram um desempenho termo hidráulico satisfatório de acordo com o critério adotado. Por outro lado, Na Fig. 4.36b, pode ser observado que as amostras de nanofluido OT-CNT_800 apresentaram incrementos significativos no coeficiente de transferência de calor, que fora em média de, 3,6%, 7,1% e 7,7% para as amostras OT-CNT_800_1, OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3, respectivamente. Cabe destacar, que as amostras de nanofluido OT-CNT_800, apresentaram uma diminuição da potência de bombeamento em função da adição de nanopartícula. Destacando que, a amostra as amostras OT-CNT_800_2 e OT-CNT_800_3 apresentaram uma diminuição na potência de bombeamento na ordem de 2,8% e 8,5%, respectivamente. Este comportamento

foi devido aos decrementos obtidos na queda de pressão na seção de teste. Assim, estas últimas duas amostras apresentaram um desempenho termo-hidráulico satisfatório.

4.8. Modelos matemáticos propostos para as propriedades termofísicas

4.8.1. Modelo de condutividade térmica nas amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%)

Com base aos resultados obtidos experimentalmente da condutividade térmica nas amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), foi proposto um modelo matemático descrito na Eq. que possibilita a obtenção desta propriedade física. A correlação descrita na Eq. 4.2 considera o efeito da concentração de nanopartícula e os efeitos da condutividade térmica do fluido base e da nanopartícula. O modelo é também dependente de duas constantes, C_1 e C_2 , descritas na Tab. 4.5, que estão associadas aos possíveis efeitos da forma e o tamanho de cada tipo de nanopartícula.

$$k_{nf}(k_{fb}, k_{np}, \phi) = \left(1 + \frac{k_{np}}{C_1} \cdot \phi^{C_2} \right) \cdot k_{fb} \quad (4.2)$$

Tabela 4.5 – Constantes do modelo de condutividade térmica para amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%).

Fluido	C_1	C_2	R^2
CNT_800	1718	0.4141	0.985
CNT_300	3399	0.3489	0.990
DO	2842	0.3072	0.981
AG_20	242,5	0.3856	0.969
AG_80	365,1	0.2721	0.992
Al ₂ O ₃	6,541	0.6607	0.987

As Figs. 4.37 e 4.38, apresentam as comparações entre os resultados experimentais da condutividade térmica para as amostras de nanofluidos a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e os resultados obtidos por intermédio da correlação proposta, apresentada pela Eq. 4.2. Portanto, segundo as Fig. 4.37 e Fig. 4.38, pode ser observada e verificada a boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos com o modelo da condutividade térmica descrito na Eq. 4.2.

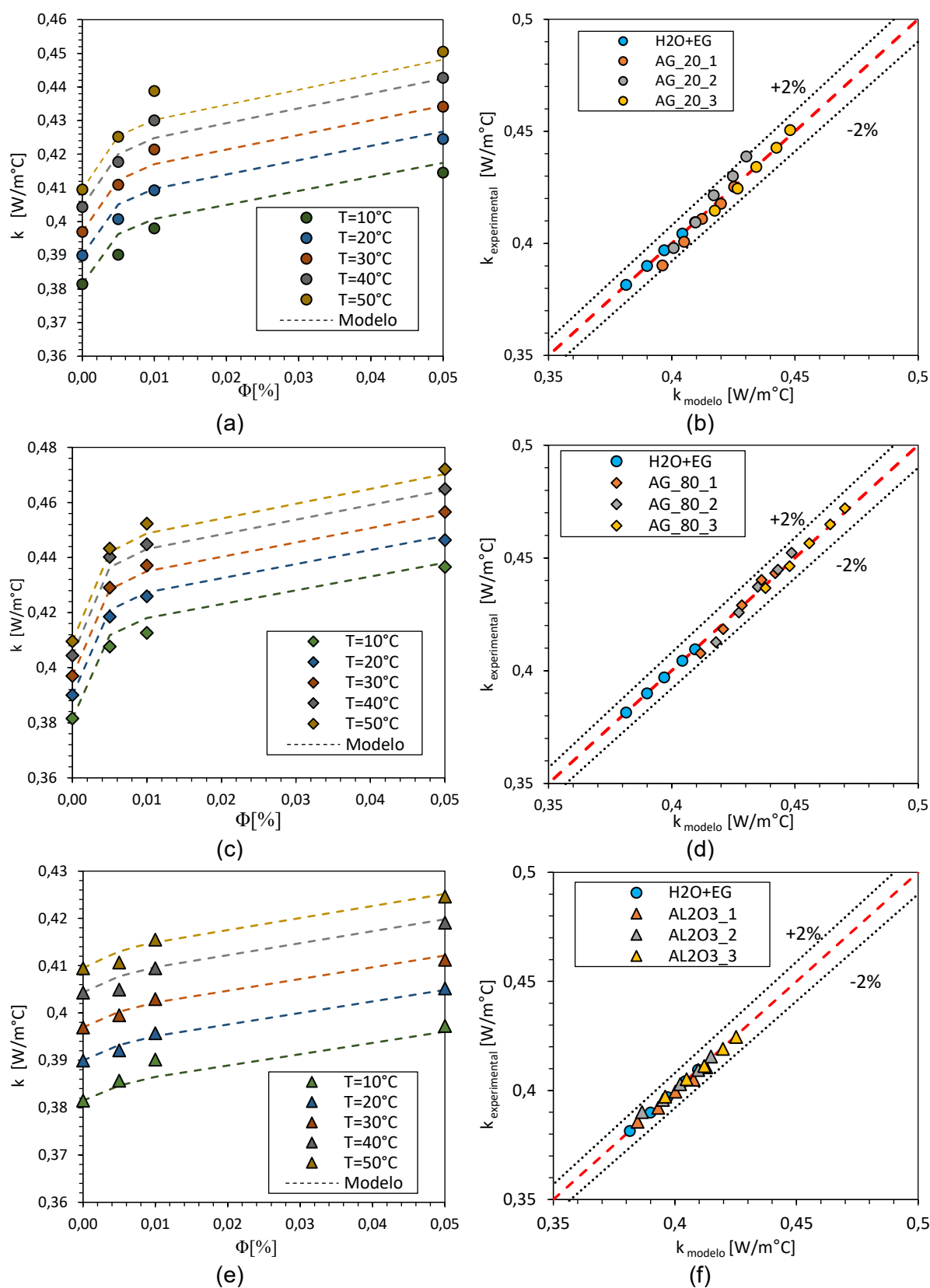


Figura 4.37 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) Ag₂₀ ($k \times \phi$). (b) Ag₂₀ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (c) Ag₈₀ ($k \times \phi$). (d) Ag₈₀ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (e) Al₂O₃ ($k \times \phi$). (f) Al₂O₃ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$).

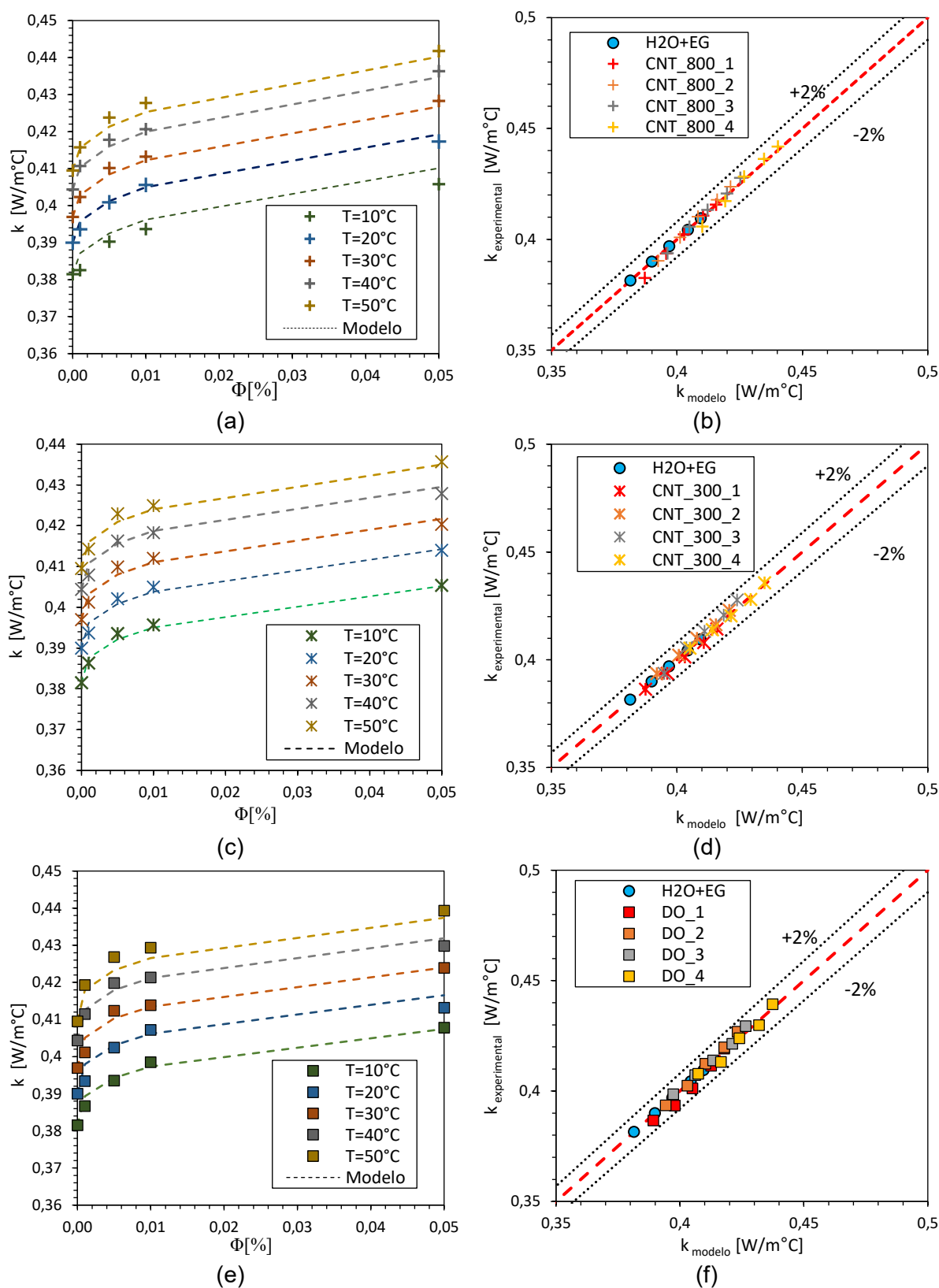


Figura 4.38 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) CNT_800 ($k \times \phi$). (b) CNT_800 ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (c) CNT_300 ($k \times \phi$). (d) CNT_300 ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (e) DO ($k \times \phi$). (f) DO ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$).

4.8.2. Modelo de condutividade térmica amostras a base de (OT-100)

Uma correlação da condutividade térmica das amostras a base de óleo térmico OT-100 também é proposta. O modelo descrito na Eq. 4.3, foi fundamentado nos resultados experimentais obtidos as amostras de nanofluido com nanopartículas de prata e de nanotubo de carbono, OT-Ag_80 e OT_CNT_800.

$$k_{nf}(k_{fb}, k_{fb}, \phi) = \left(1 + \frac{k_{np}}{C_1} \cdot \phi^{C_2} \right) \cdot k_{fb} + C_3 \cdot \phi \quad (4.3)$$

O modelo proposto considera o efeito da concentração de nanopartícula e os efeitos da condutividade térmica do fluido base e da nanopartícula. O modelo dependente de três constantes, C_1 , C_2 e C_3 descritas na Tab. 4.6. Neste modelo, as constantes C_1 e C_2 que podem estar associadas aos possíveis efeitos da forma e o tamanho nanopartículas. No entanto, a constante C_3 está associada ao efeito da agregação de nanopartículas que em função da concentração tendem a se intensificar, possibilitando a instabilidade da amostra, consequentemente minimizando os incrementos da condutividade.

Tabela 4.6 - Constantes do modelo de condutividade térmica para amostras de nanofluido a base de (OT-100).

Fluido	C_1	C_2	C_3	R^2
OT_AG_80	10060	0.009565	-6.177	0.972
OT_CNT_800	1.8740	0.8517	-653.6	0.964

A boa concordância entre os resultados experimentais da condutividade térmica das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação proposta pode ser verificada na Fig. 4.39 que apresenta as comparações entre os valores obtidos das medições e do modelo descrito na Eq. 4.3.

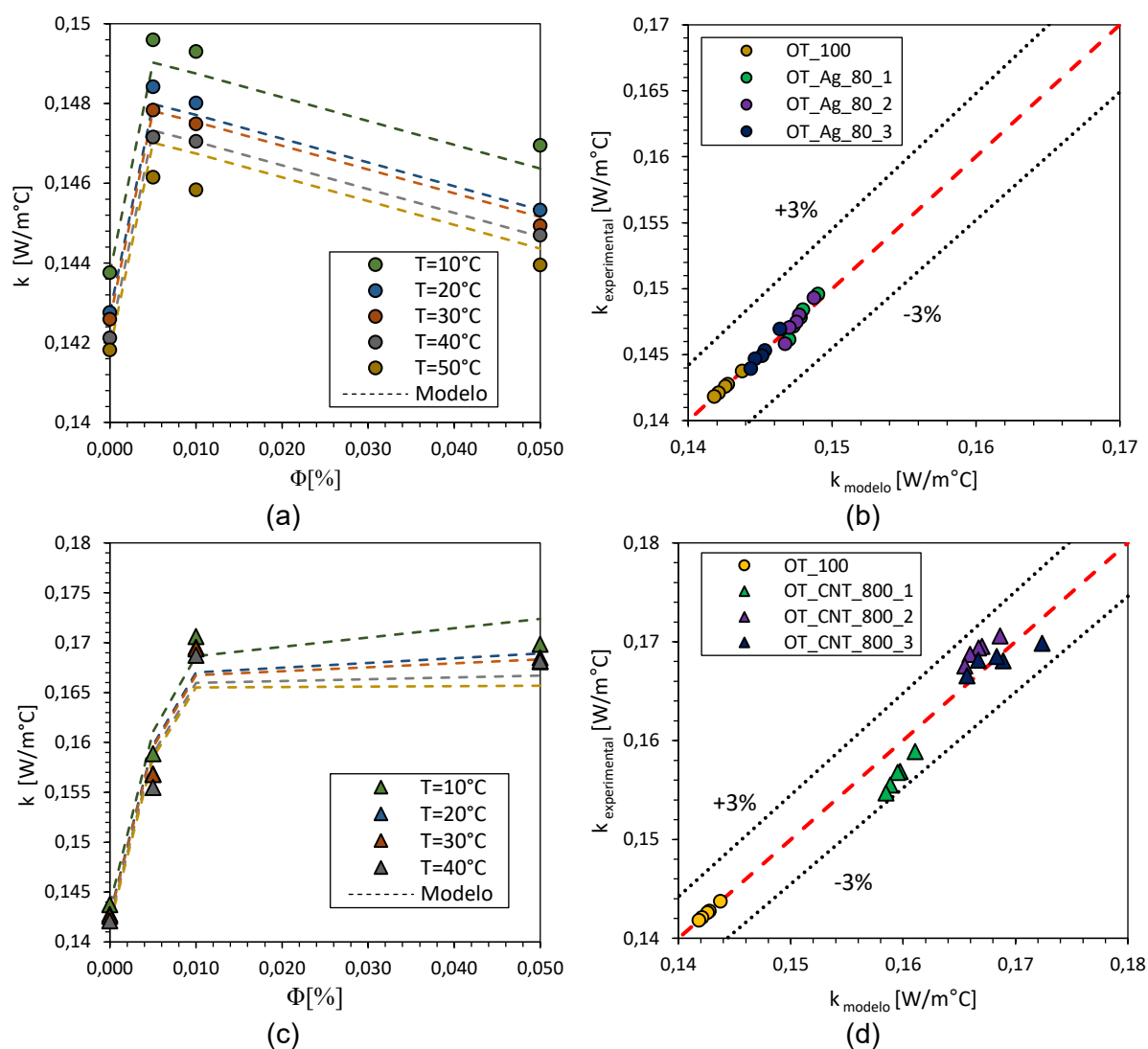


Figura 4.39 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para condutividade térmica. (a) OT-Ag_80 ($k \times \phi$). (b) OT-Ag_80 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) OT-CNT_800 ($k \times \phi$). (d) OT-CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$).

4.8.3. Modelo da viscosidade dinâmica nas amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%)

A partir dos resultados da viscosidade dinâmica obtidos experimentalmente para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), foi proposto um modelo matemático descrito na Eq. que possibilita a obtenção da viscosidade dinâmica das amostras de nanofluido, que considera é dependente da concentração de nanopartícula e da viscosidade do fluido base. O modelo dependente de uma constante, C , descritas na Tab. 4.6 para cada tipo de nanofluido.

$$\mu_{nf}(\mu_{fb}, \phi) = (1 + C \cdot \phi) \cdot \mu_{fb} \quad (4.4)$$

Tabela 4.7 - Constantes do modelo de viscosidade dinâmica para amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%).

Fluido	C	R^2
CNT_800	152.10	0.997
CNT_300	106.70	0.998
DO	99.44	0.998
AG_20	43.15	0.999
AG_80	42.37	0.999
AL ₂ O ₃	56.02	0.999

As Fig. 4.40 e Fig. 4.41, apresentam as comparações entre os resultados experimentais da viscosidade dinâmica para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e os resultados obtidos por intermédio da correlação proposta, apresentada pela Eq. 4.4. Portanto, segundo as Fig. 4.40 e Fig. 4.41, pode ser observada e verificada a boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos com a correlação proposta.

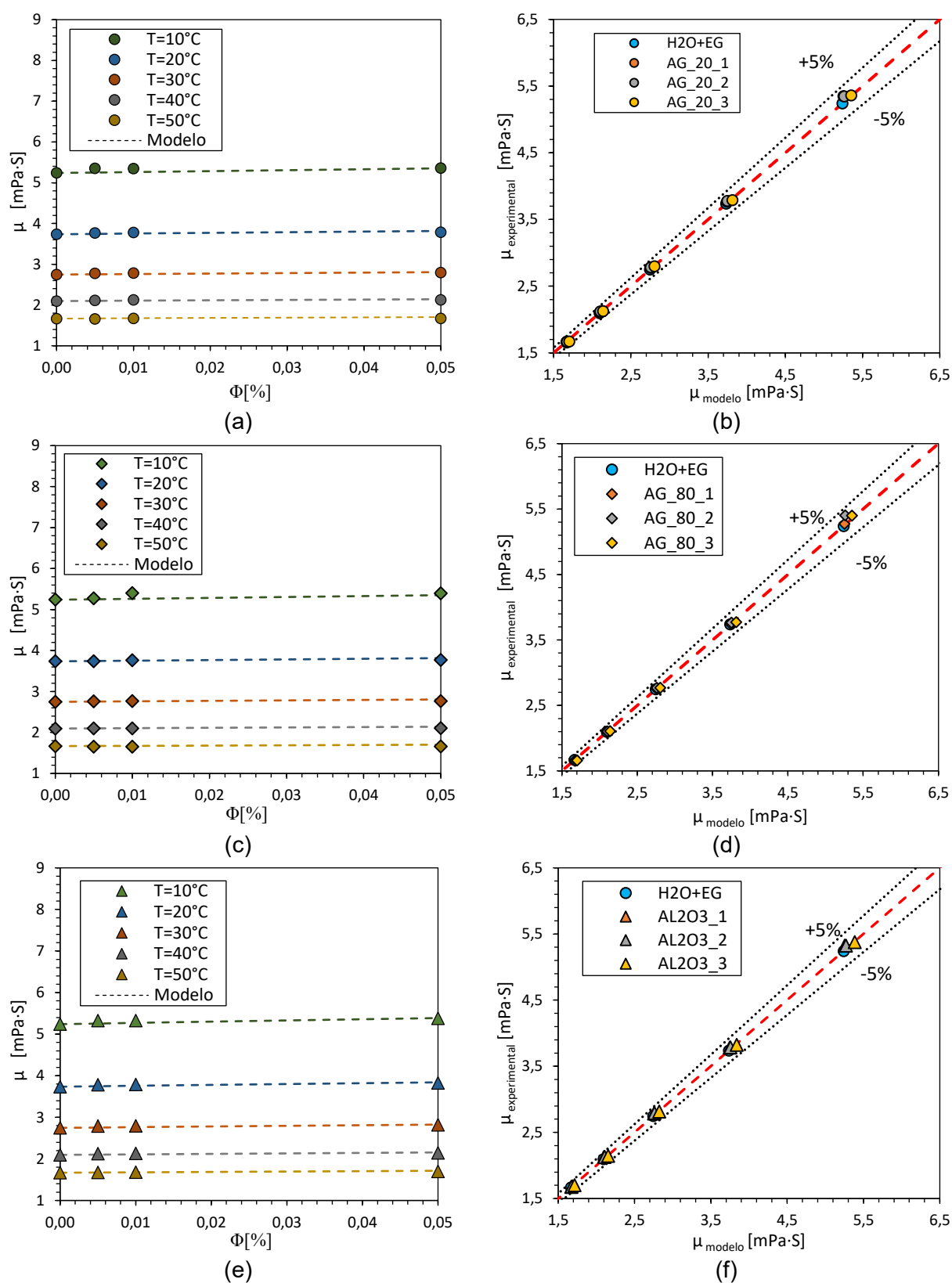


Figura 4.40 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) Ag₂₀ ($k \times \phi$). (b) Ag₂₀ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (c) Ag₈₀ ($k \times \phi$). (d) Ag₈₀ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$). (e) Al₂O₃ ($k \times \phi$). (f) Al₂O₃ ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$).

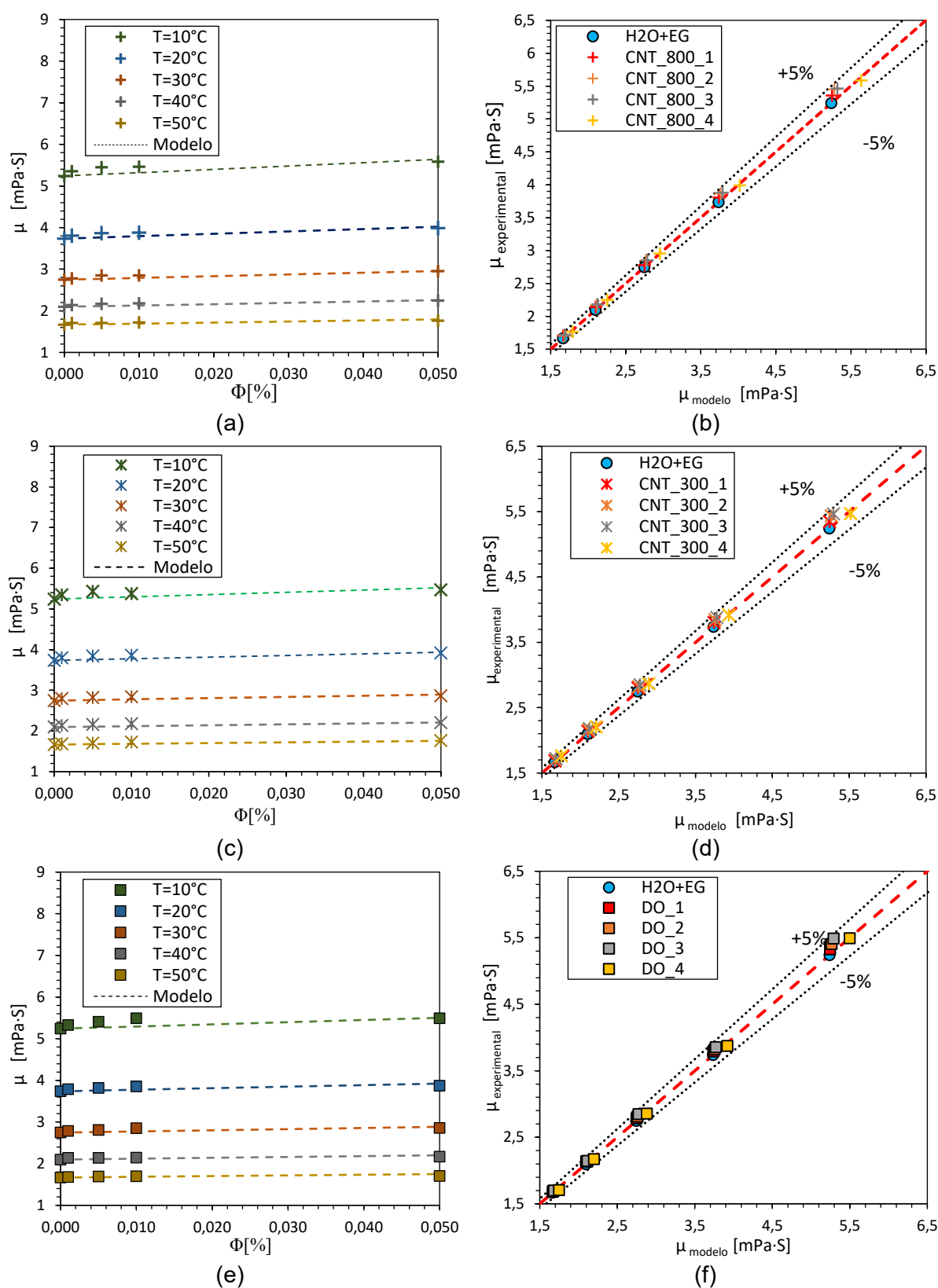


Figura 4.41 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para viscosidade dinâmica. (a) CNT_800 ($k \times \phi$). (b) CNT_800 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (c) CNT_300 ($k \times \phi$). (d) CNT_300 ($k_{exp} \times k_{mod.}$). (e) DO ($k \times \phi$). (f) DO ($k_{exp} \times k_{mod.}$).

4.8.4. Modelo da viscosidade dinâmica nas amostras a base de (OT-100)

O modelo proposto para a determinar a viscosidade das amostras de nanofluido a base de óleo térmico OT-100 é igual a aquele descrito na Eq. 4.4 para a viscosidade das amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%). No entanto a constante C , característica de cada amostra de nanofluido a base de óleo térmico é descrita na Tab. 4.8

Tabela 4.8 - Constantes do modelo de viscosidade dinâmica para amostras de nanofluido a base de (OT-100).

Fluido	C	R^2
OT_AG_80	12.90	1.0000
OT_CNT_800	26.51	1.0000

As Figs. 4.42 e 4.43, apresentam as comparações entre os resultados experimentais da viscosidade dinâmica para as amostras de nanofluidos com nanopartícula de prata (OT_Ag_20) e nanotubo de carbono (OT_CNT_800), respectivamente. Nesse sentido, nas Figs. 4.42 e 4.43, pode ser observada e verificada a boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos com a correlação proposta descrita na Eq. 4.4.

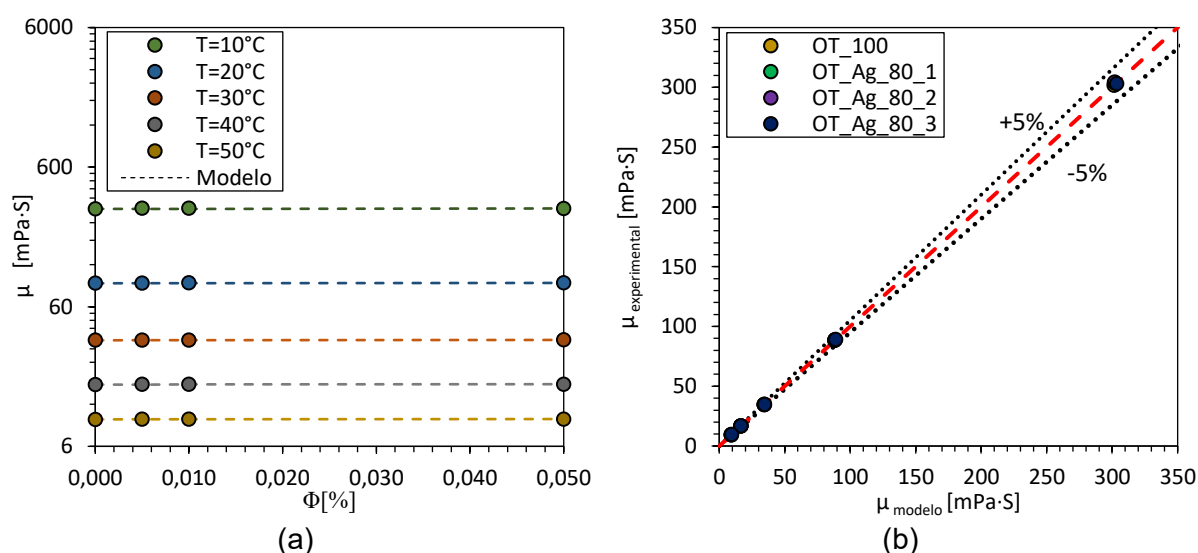


Figura 4.42 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) OT-Ag_80 ($k \times \phi$). (b) OT-Ag_80 ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$).

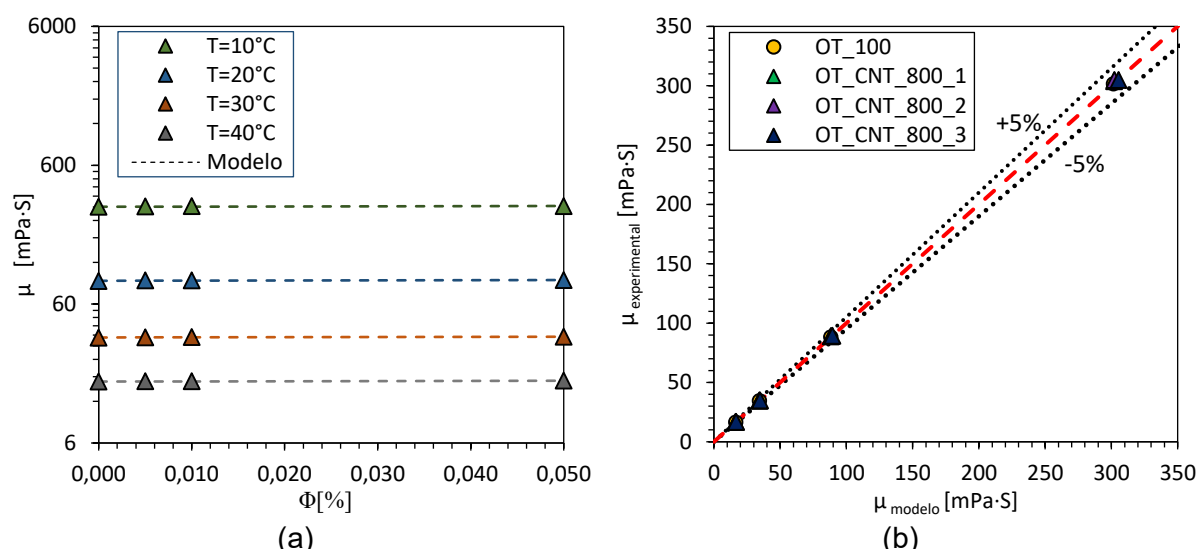


Figura 4.43 - Comparação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto para Viscosidade dinâmica. (a) OT-CNT_800 ($k \times \phi$). (b) OT-CNT_800 ($k_{\text{exp}} \times k_{\text{mod.}}$).

4.9. Modelo matemático proposto para a transferência de calor por convecção

4.9.1. Transferência de calor por convecção em regime turbulento nas amostras de nanofluido a base de ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%)

A Fig. 4.44, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidos experimentalmente para as amostras de nanofluidos a base de ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) em escoamento regime turbulento plenamente desenvolvido e o coeficiente de transferência de calor obtidos por intermédio da correlação de Gnielinski (1975), apresentada pela Eq. 3.22. A Tab. 4.5 apresenta, especificamente, os desvios médios resultados da comparação entre o modelo clássico e os resultados experimentais das amostras de nanofluido ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%).

Tabela 4.9 - Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Gnielinski (1975).

Nanofluido		Desvio médio apresentado com a correlação de Gnielinski (1975)			
		($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]		10,5%	10,5%	11,9%
Ag_80	[-]		11,8%	14,7%	18,2%
Al_2O_3	[-]		12,1%	11,7%	10,4%
CNT_800		14,5%	16,9%	17,5%	22,9%
CNT_300		13,7%	16,2%	17,5%	20,1%
DO		15,7%	22,1%	25,8%	18,8%

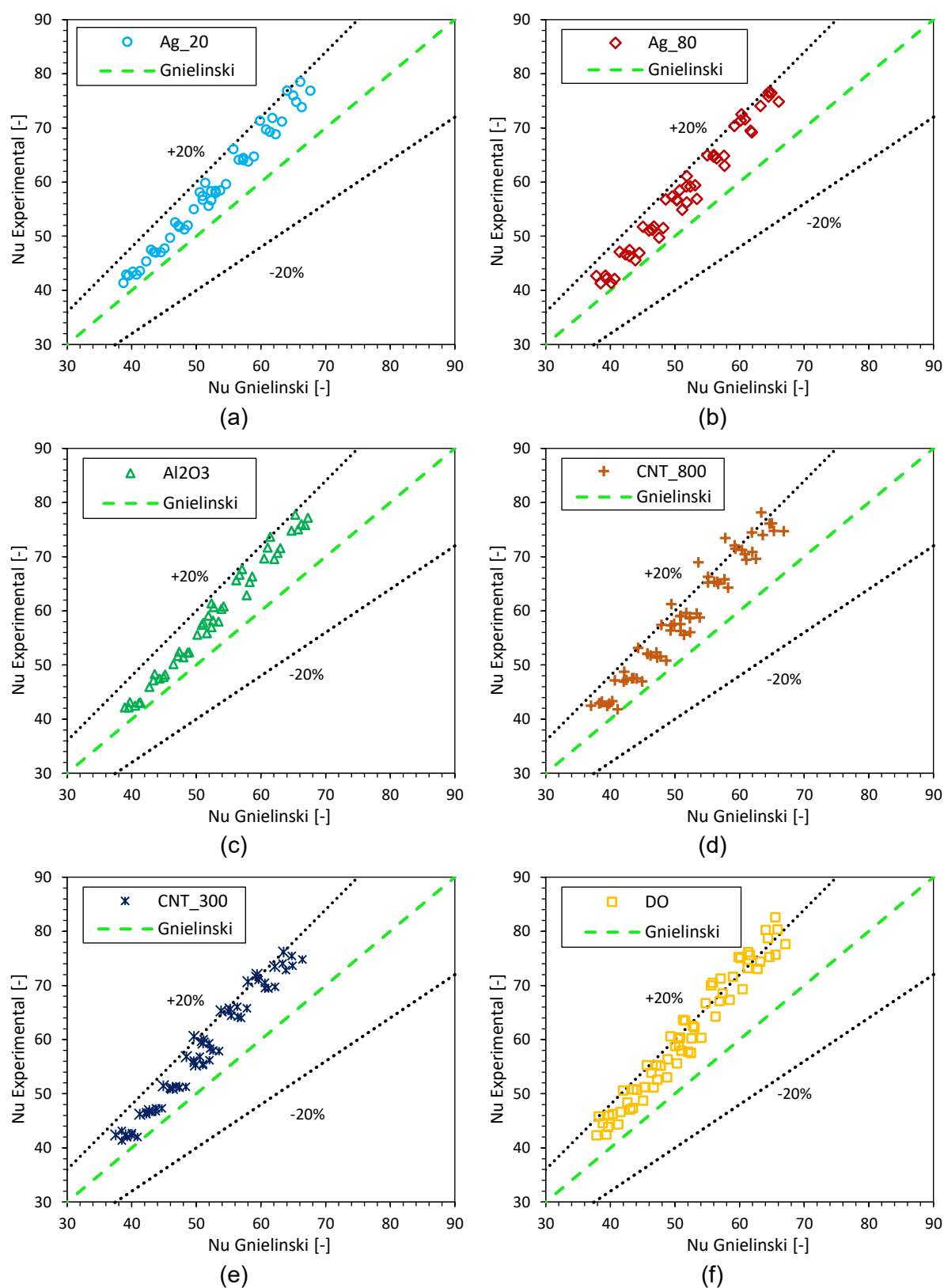


Figura 4.44 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação de Gnielinski (1975). (a) Ag₂₀. (b) Ag₈₀. (c) Al₂O₃. (d) CNT₈₀₀. (e) CNT₃₀₀. (f) DO.

Pode ser visualizado pela Fig. 4.44, que os pontos experimentais dos testes realizados de transferência de calor, apresentaram desvios fora da margem de erro de $\pm 20\%$ do modelo clássico utilizado na comparação. Portanto, a partir dos valores dos desvios médios entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o modelo clássico de Gnielinski (1975), apresentados na Tab. 4.9, foi visualizada a necessidade de propor um modelo matemático que possibilite um melhor ajuste dos resultados experimentais da transferência de calor em escoamento plenamente em regime turbulento para as amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em tubos horizontais lisos.

Assim, o ponto de partida para especificar o modelo da transferência de calor por convecção, é a dependência do processo de transferência de calor com o campo de escoamento, consequentemente ao número de Reynolds, e as taxas de transferência de calor e quantidade de movimento, que são relacionadas ao número de Prandtl, Pr. Segundo, (HOLMAN, 1999) uma relação exponencial para cada um destes parâmetros dada na forma base descrita na Eq. 4.5. pode ser utilizada para correlacionar os resultados experimentais da transferência de calor.

$$Nu_d = C_x \cdot Re_d^m \cdot Pr^n \quad (4.5)$$

Onde, C_x , n e m , são constantes determinadas a partir dos resultados experimentais. No entanto, o expoente do número de Prandtl, n , foi definido como, $n=0,4$, quando o fluido está sendo aquecido ($T_{p(x)} > T_{m(x)}$), assumindo a relação recomendada por (DITTUS e BOELTER, 1930) para escoamento turbulento plenamente desenvolvido em tubo liso. Portanto, definido inicialmente o valor de n , todos os dados da transferência de calor foram correlacionados para determinar o valor de m . Como resultado desse processo, foi obtido um valor para o expoente do número de Reynolds, $m=1,3378$. A constante, C_x , é um parâmetro que considera também o efeito da adição de nanopartículas na transferência de calor por convecção nas amostras de nanofluido. Nesse sentido a constante, C_x , foi definida conforme o modelo descrito na Eq. 4.6.

$$C_x = C \cdot \left(1 + C_{nf} \phi^{x_{nf}} \right) \quad (4.6)$$

Onde, C , é uma constante que não depende do tipo do nanofluido, sendo C , igual a 0,000223. Por outro lado, C_{nf} é uma constante de depende do tipo do nanofluido, ϕ , é a fração volumétrica de nanopartícula elevada a uma potência, x_{nf} , cujo valor depende também do tipo de nanofluido. Assim, combinando as Eq. 4.5 e 4.6 foi obtido o modelo geral descrito na Eq. 4.7, que correlaciona os resultados da transferência de calor por convecção em regime turbulento das amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%).

$$Nu_{nf} = (1 + C_{nf} \cdot \phi^{x_{nf}}) \cdot C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (4.7)$$

Válida para uma faixa de escoamento de $2800 \leq Re \leq 5500$ e concentrações de nanopartícula de $0 \leq \phi \leq 0,05\%$. Os valores das constantes, x_{nf} e C_{nf} , do modelo apresentado na Eq. 4.7 são descritos na Tab. 4.10. Assim, Fig. 4.45, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidos experimentalmente em escoamento regime turbulento plenamente desenvolvido e o coeficiente de transferência de calor obtidos por intermédio do modelo proposto no presente trabalho descrito pela Eq. 4.7.

Tabela 4.10 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime turbulento e indicadores de ajuste.

Nanofluido	C_{nf}	x_{nf}	R^2
AG_20	0,9633	0,4322	0,9918
AG_80	0,6376	0,3271	0,9893
Al ₂ O ₃	0,0274	0,0101	0,9904
CNT_800	4,5460	0,4899	0,9904
CNT_300	1,9801	0,4389	0,9898
DO0	0,1331	0,0569	0,9788

A Tab. 4.11 apresenta os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais das amostras de nanofluido (H₂O:EG 50:50 wt%). Portanto, a partir da Tab. 4.11 e da Fig. 4.45, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto para a transferência de calor de nanofluidos em escoamento turbulento plenamente desenvolvido em tubo horizontais lisos.

Tabela 4.11 -Desvio médio dos dados experimentais em regime turbulento e o modelo de descrito na Eq. 4.7.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]	0,3%	0,07%	-0,2%
Ag_80	[-]	0,5%	-0,9%	0,3%
Al ₂ O ₃	[-]	0,4%	0,06%	-0,8%
CNT_800	-0,6%	0,4%	0,1%	-0,5%
CNT_300	-0,3%	-0,01%	-0,05%	-0,5%
DO	-7,9%	-2,8%	-0,4%	-6,5%

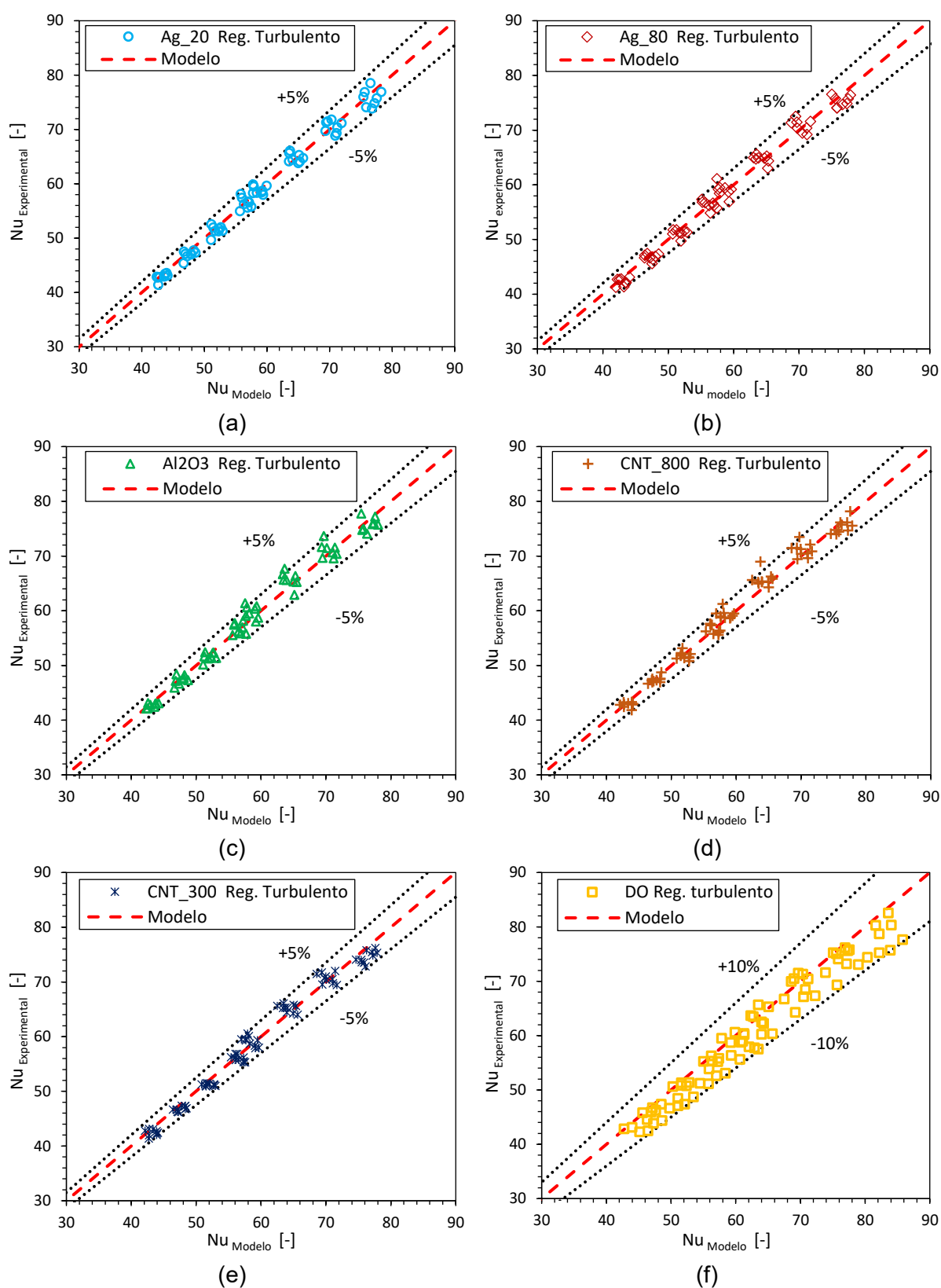


Figura 4.45- Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação proposta em regime turbulento. (a) Ag₂₀. (b) Ag₈₀. (c) Al₂O₃. (d) CNT₈₀₀. (e) CNT₃₀₀. (f) DO.

4.9.2. Transferência de calor por convecção em regime laminar nas amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%)

A Fig. 4.46, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidos experimentalmente para as amostras de nanofluidos a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) em escoamento regime laminar e o coeficiente de transferência de calor obtidos por intermédio da correlação de Sieder e Tate (1936), apresentada pela Eq. 3.21. A Tab. 4.12 apresenta, os desvios médios da comparação entre o modelo clássico e os resultados experimentais obtidos em regime laminar para as amostras de nanofluido (H₂O:EG 50:50 wt%).

Tabela 4.12- Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Sieder e Tate (1936).

Nanofluido		Desvio médio apresentado com a correlação de Sieder e Tate (1936)			
		($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]		13,6%	12,3%	10,6%
Ag_80	[-]		14,2%	11,2%	10,9%
Al ₂ O ₃	[-]		15,4%	15,1%	13,2%
CNT_800	18,2%	17,6%	19,7%	17,6%	
CNT_300	18,3%	16,2%	16,5%	16,6%	
DO	19,4%	21,5%	21,3%	16,8%	

Pode ser observado pelas Fig. 4.46, que os pontos experimentais dos testes realizados de transferência de calor em regime laminar, apresentam desvios fora da margem de erro de $\pm 20\%$ do modelo clássico utilizado na comparação. Portanto, é também proposto um modelo matemático para a transferência de calor em regime laminar que correlacione com menor dispersão os dados obtidos da transferência de calor em escoamento em regime laminar para as amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em tubos horizontais lisos.

Nesse sentido, o modelo matemático utilizado para correlacionar os dados em regime laminar foi aquele descrito na Eq. 4.7. Onde C, n e m, também foram determinadas a partir dos resultados experimentais em regime laminar. Assim, o expoente do número de Prandtl, n, foi definido como $n=1/3$. Portanto, definido o valor de n, todos os dados da transferência de calor foram correlacionados para determinar o valor de m. Como resultado desse processo, foi obtido um valor para o expoente do número de Reynolds $m=0,5359$.

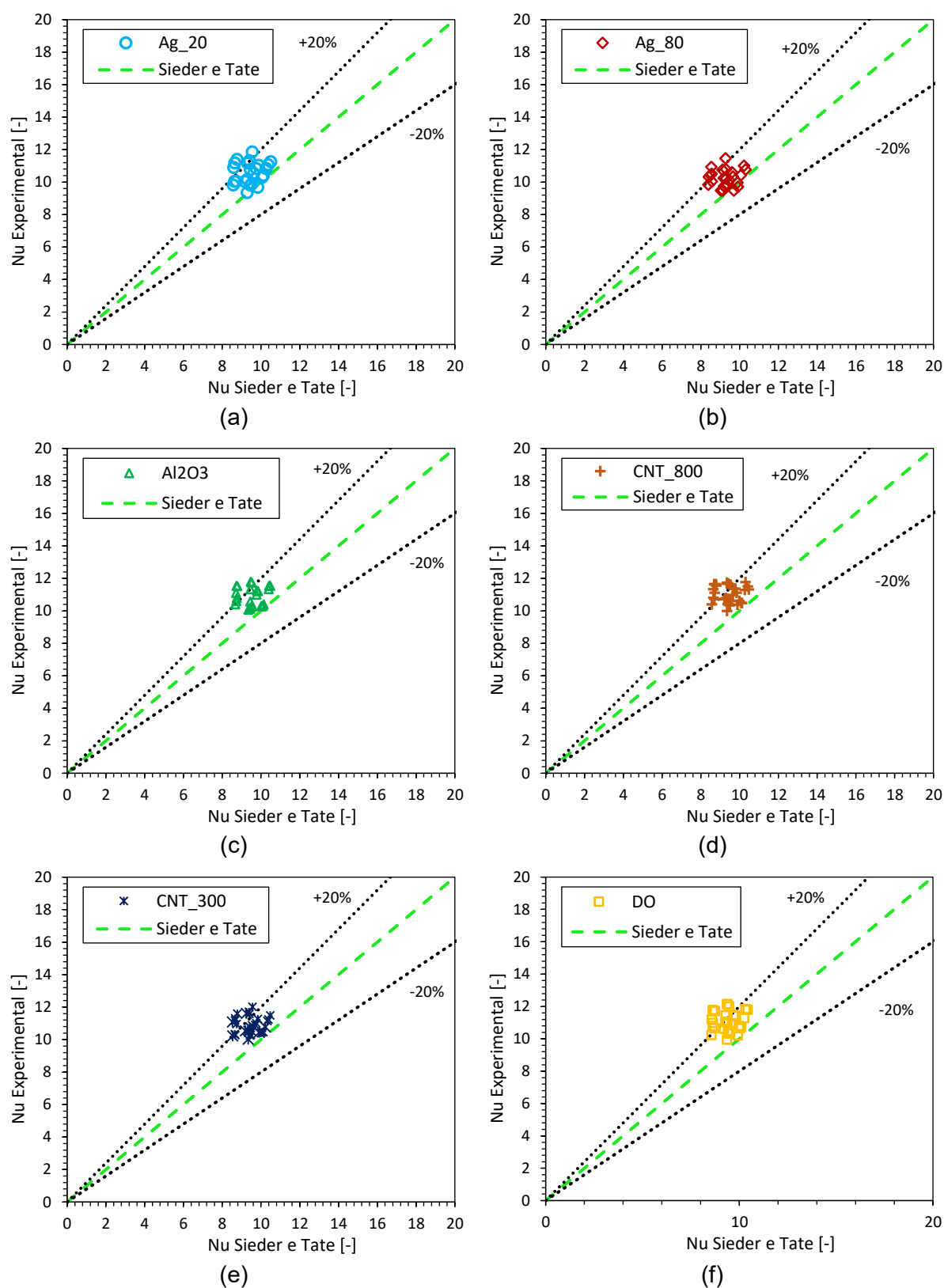


Figura 4.46 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação de Sieder e Tate (1936). (a) Ag_{20} . (b) Ag_{80} . (c) Al_2O_3 . (d) CNT_{800} . (e) CNT_{300} . (f) DO .

O valor da constante C determinada para o modelo da transferência de calor em regime laminar é igual a 0,0739. A constante C_{nf} , e a constante exponencial da concentração volumétrica de nanopartícula, x_{nf} , que dependem do tipo de nanofluido, são descritas na Tab. 4.13. Assim, Fig. 4.47, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidos experimentalmente em escoamento regime laminar e o coeficiente de transferência de calor obtidos por intermédio do modelo proposto no presente trabalho descrito pela Eq. 4.7, adotando as constantes respectivas de cada tipo de nanofluido apresentadas na Tab. 4.13.

Tabela 4.13 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime laminar para amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste.

Nanofluido	C_{nf}	x_{nf}	R^2
AG_20	-0.333	0.226	0.7546
AG_80	-0.324	0.190	0.7482
Al ₂ O ₃	-0.225	0.236	0.7413
CNT_800	-0.051	0.243	0.7454
CNT_300	-0.187	0.236	0.7496
DO	7.880	2.946	0.7529

A Tab. 4.14 apresenta, os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais das amostras de nanofluido (H₂O:EG 50:50 wt%). Portanto, a partir da Tab. 4.14 e da Fig. 4.47, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto para a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar.

Tabela 4.14 -Desvio médio dos dados experimentais em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.7.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]	0,2%	-0,5%	-0,06%
Ag_80	[-]	1,2%	-1,4%	0,4%
Al ₂ O ₃	[-]	0,01%	0,1%	0,1%
CNT_800	-1,2%	-0,5%	0,7%	0,3%
CNT_300	0,4%	-0,9%	-0,3%	0,6%
DO	-0,2%	1,4%	1,9%	-2,2%

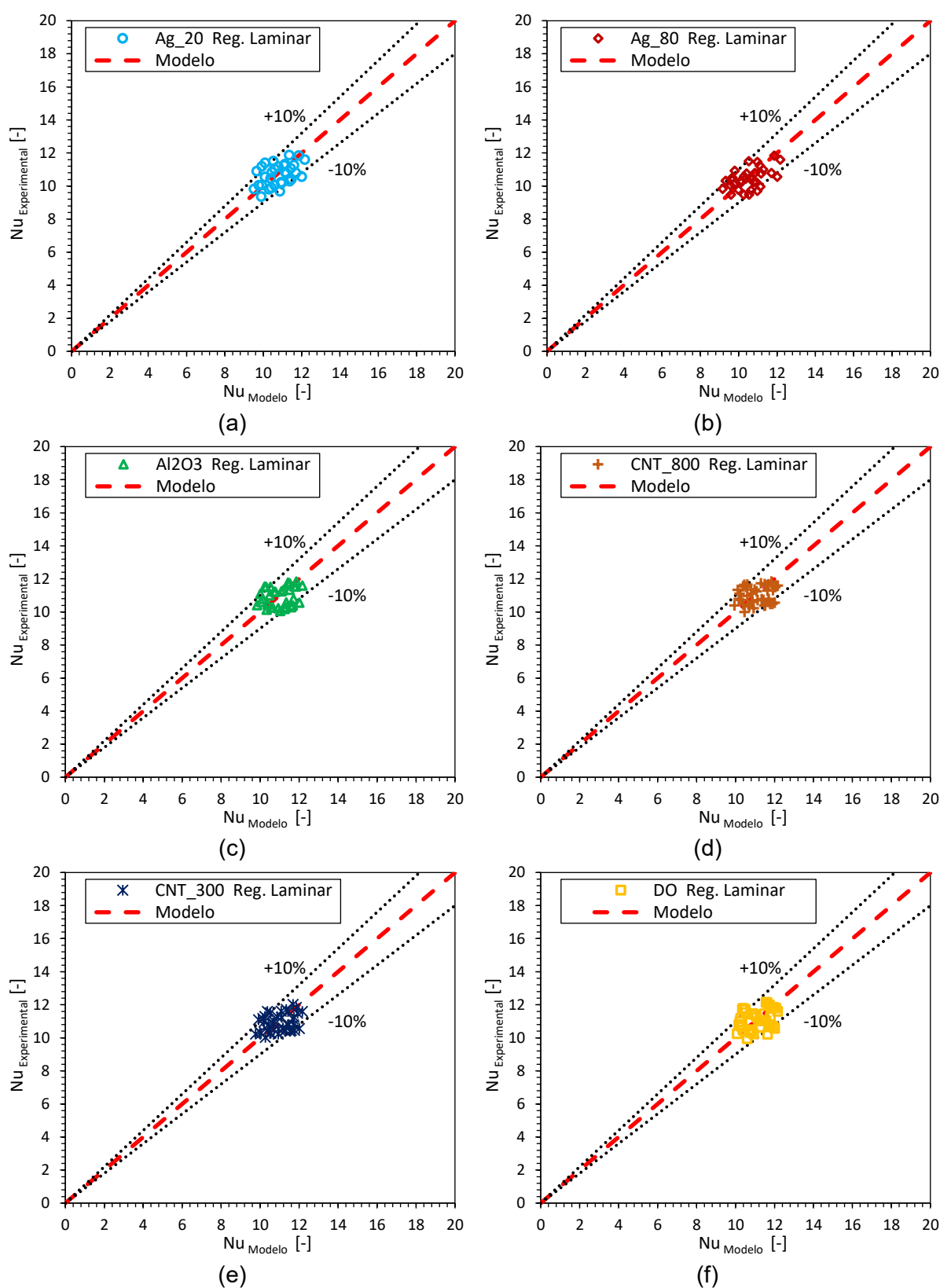


Figura 4.47 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção experimental e a correlação proposta em regime laminar para as amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%). (a) Ag₂₀. (b) Ag₈₀. (c) Al₂O₃. (d) CNT₈₀₀. (e) CNT₃₀₀. (f) DO.

4.9.3. Transferência de calor por convecção em regime laminar nas amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100)

A Fig. 4.48, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidos experimentalmente para as amostras de nanofluidos a base de óleo térmico OT-100 em escoamento em regime laminar e o coeficiente de transferência de calor obtidos por intermédio da correlação de Sieder e Tate (1936), descrita na Eq. 3.21.

Os resultados do coeficiente de transferência de calor em regime laminar para as amostras de nanofluido a base de óleo térmico apresentou desvios fora da margem de erro de $\pm 15\%$ do modelo clássico de Sieder e Tate (1936) utilizado na comparação apresentada na Fig. 4.48. A Tab. 4.15 apresenta, os desvios médios da comparação entre o modelo clássico e os resultados experimentais obtidos em regime laminar para as amostras de nanofluido a base de óleo térmico. Assim, pode ser observado que o modelo clássico de Sieder e Tate (1936) apresenta uma boa concordância como resultados experimentais da transferência de calor.

Tabela 4.15 - Desvio médio dos dados experimentais e o modelo de Sieder e Tate (1936).

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação de Sieder e Tate (1936)			
	($\phi=0\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
OT-Ag_80	3,4%	2,2%	2,5%	4,4%
OT-CNT_800	3,4%	0,5%	-0,6%	1,8%

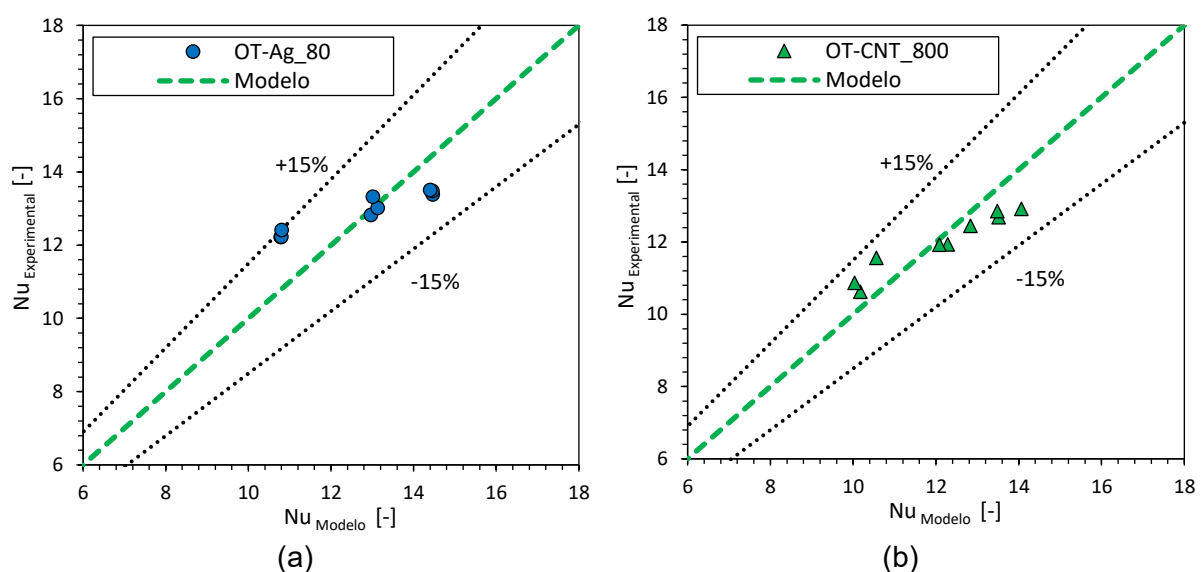


Figura 4.48 - Comparação entre os resultados experimentais da transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação de Sieder e Tate (1936). (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800.

No entanto, é proposta uma correlação para a transferência de calor em regime laminar que se ajuste com menor dispersão aos dados obtidos experimentalmente da transferência de calor de para as amostras de nanofluido a base óleo térmico em tubos horizontais lisos. Assim, o modelo matemático proposto para correlacionar os dados em regime laminar é descrito na Eq. 4.8.

$$Nu_{nf} = (1 + \phi^{x_{nf}}) \cdot C_{nf} \cdot (Re \cdot Pr)^m \quad (4.8)$$

Onde C_{nf} , x_{nf} e m , foram determinadas a partir dos resultados experimentais para cada tipo de nanofluido e cujos valores são apresentados na Tab. 4.16. A comparação entre os resultados experimentais da transferência de calor por convecção para as amostras de nanofluido a base de óleo térmico e os resultados obtidos por intermédio da correlação proposta descrita pela Eq. 4.8, pode ser observada na Fig. 4.49.

Tabela 4.16 - Constantes do modelo de transferência de calor em regime laminar para amostras a base de OT-100 e indicadores de ajuste.

Nanofluido	C_{nf}	x_{nf}	m	R^2
OT-AG_80	2,995	0.596	0.136	0.944
OT-CNT_800	1,132	3.710	0.223	0.883

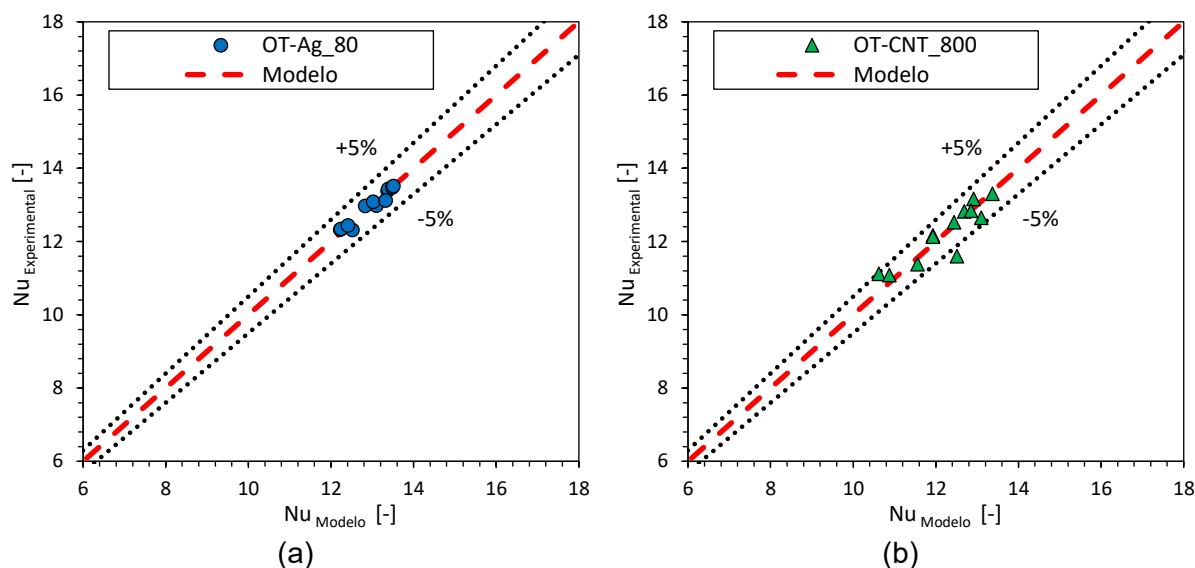


Figura 4.49 - Comparação entre os resultados experimentais da transferência de calor por convecção das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação proposta (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800.

A Tab. 4.17 apresenta, os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais para a transferência de calor das amostras de nanofluido a base de óleo térmico OT-100. Consequentemente, a partir da Tab. 4.17 e da Fig.

4.49, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto.

Tabela 4.17 - Desvio médio dos dados experimentais em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.8.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_80	0,8%	-0,8%	-0,5%	0,5%
CNT_800	4,0%	-0,3%	-2,5%	-1,2%

4.10. Modelo matemático proposto para fator de atrito

4.10.1. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%) em regime turbulento

O fator de atrito é definido como uma medida adimensional da tensão de cisalhamento na parede do tubo dependente do campo de escoamento, consequentemente ao número de Reynolds. Assim, em regime turbulento este parâmetro é consistente fisicamente com uma relação exponencial deste parâmetro dada na forma base descrita na Eq. 4.9.

$$f = C_x \cdot Re_d^m \quad (4.9)$$

Onde, C_x , e m , são constantes determinadas a partir dos resultados experimentais. Como resultado desse processo, foi obtido um valor para o expoente do número de Reynolds, $m=-0,1569$. A constante, C_x , é um parâmetro que considera também o efeito da adição de nanopartículas no fator de atrito das amostras de nanofluido. Nesse sentido, a constante, C_x , foi definida conforme o modelo descrito na Eq. 4.10.

$$C_x = C \cdot \left(1 + C_{nf} \phi\right)^{x_{nf}} \quad (4.10)$$

Onde, C , é uma constante que não depende do tipo do nanofluido, sendo C , igual a 0,1514. Por outro lado, C_{nf} é uma constante dependente do tipo do nanofluido, ϕ , é a fração volumétrica de nanopartícula elevada a uma potência, x_{nf} , cujo valor depende também do tipo de nanofluido. Assim, combinando as Eqs. 4.9 e 4.10, foi obtido um modelo geral descrito na Eq. 4.11, que correlaciona os resultados do fator de atrito em regime turbulento das amostras de nanofluido a base de ($H_2O:EG$ 50:50 wt%).

$$f_{nf} = (1 + C_{nf} \cdot \phi)^{x_{nf}} \cdot C \cdot Re^m \quad (4.11)$$

Válida para números de Reynolds de $2800 \leq Re \leq 5500$ e concentrações de nanopartícula de $0 \leq \phi \leq 0,05\%$. Os valores das constantes, x_{nf} e C_{nf} , do modelo apresentado na Eq. 4.11 são descritos na Tab. 4.18. Nesse sentido, a Fig. 4.50, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de atrito obtidos experimentalmente em escoamento regime turbulento plenamente desenvolvido e os valores do coeficiente de atrito obtidos por intermédio do modelo proposto no presente trabalho descrito pela Eq. 4.10, adotando as constantes de cada tipo de nanofluido apresentadas na Tab. 4.18.

Tabela 4.18 - Constantes para o modelo proposto do fator de atrito em regime turbulento e indicadores de ajuste.

Nanofluido	C_{nf}	x_{nf}	R^2
AG_20	0.2085	0.5650	0.8126
AG_80	0.1209	0.8627	0.8184
Al ₂ O ₃	0.1363	0.6787	0.8326
CNT_800	0.1971	0.8217	0.8364
CNT_300	0.6714	0.7413	0.8441
DO	0.7635	0.6279	0.8024

A Tab. 4.19 apresenta, os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais das amostras de nanofluido (H₂O:EG 50:50 wt%). Portanto, a partir da Tab. 4.19 e da Fig. 4.50, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto para a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar.

Tabela 4.19 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime turbulento e o modelo de descrito na Eq. 4.10.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]	-1,2%	-1,1%	-1,0%
Ag_80	[-]	-1,3%	0,2%	-1,5%
Al ₂ O ₃	[-]	-1,1%	-0,8%	-0,9%
CNT_800	-1,0%	0,3%	1,2%	-0,5%
CNT_300	0,3%	1,3%	1,2%	0,9%
DO	-1,0%	-1,7%	-1,2%	0,2%

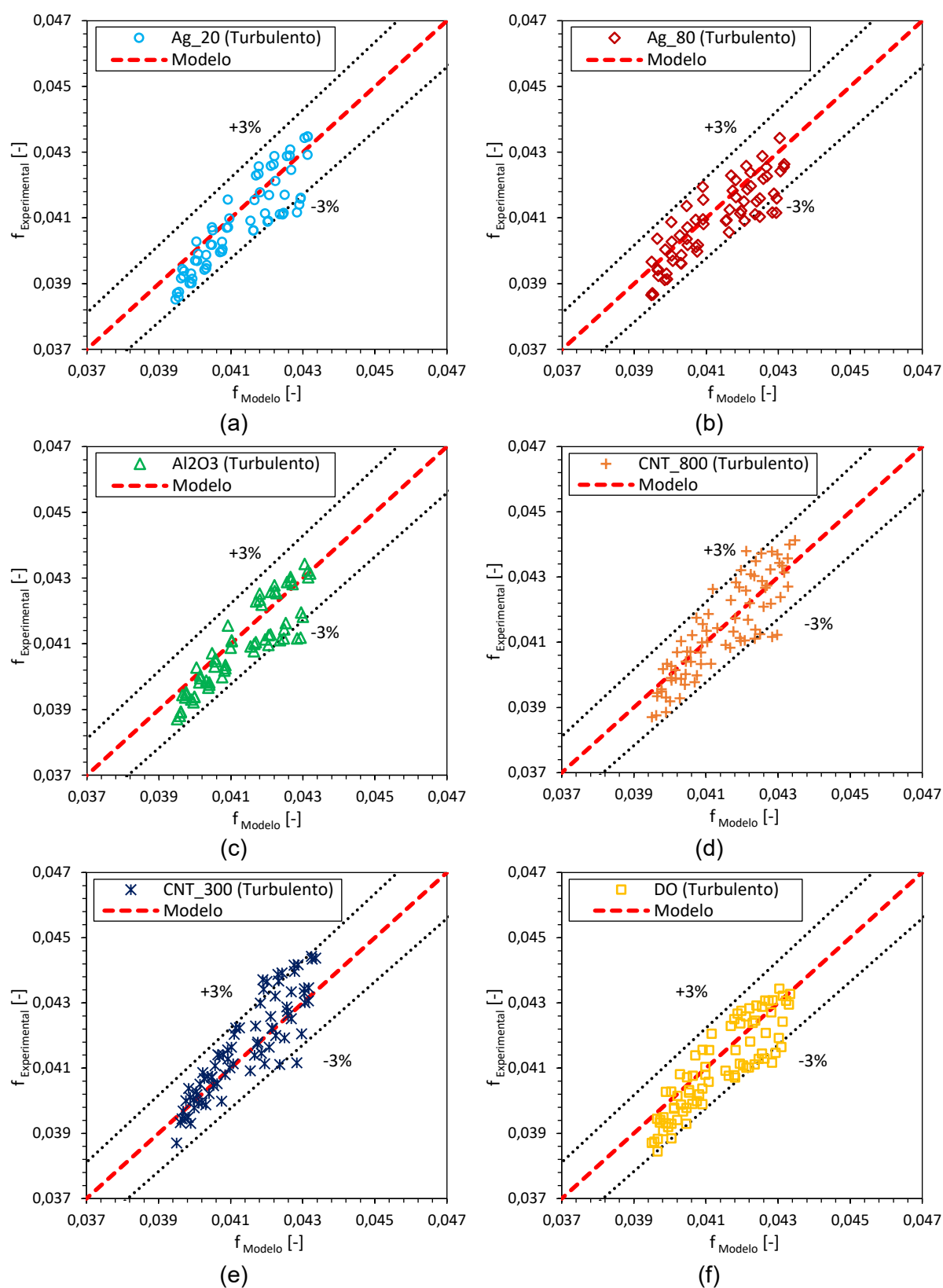


Figura 4.50 - Comparação entre o coeficiente de atrito experimental em regime turbulento para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e a correlação proposta. (a) Ag₂₀. (b) Ag₈₀. (c) Al₂O₃. (d) CNT₈₀₀. (e) CNT₃₀₀. (f) DO.

4.10.2. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) em regime laminar

Com base nas figuras apresentadas na seção 4.6.1 para fator o atrito em regime laminar das amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%), pode ser observado que os pontos experimentais do fator de atrito, apresentam desvios fora da margem de erro de $\pm 25\%$ do modelo clássico utilizado na comparação. Portanto, é proposto um modelo matemático para o fator de atrito em regime laminar que correlacione com menor dispersão os dados obtidos do fator de atrito para as amostras de nanofluido a base da mistura (H₂O:EG 50:50 wt%) em tubos horizontais lisos. Assim, o modelo matemático utilizado para correlacionar os dados do fator de atrito em regime laminar é consistente com a forma base descrita pela Eq. 4.11.

Onde, C, é igual a 7,0713 e o expoente do número de Reynolds, m, é igual a -0,7285 para todas as mostras de nanofluido produzidas a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) no presente trabalho. Assim, a correlação é válida para números de Reynolds de $Re \leq 2300$, e concentrações de nanopartícula de $0 \leq \phi \leq 0,05\%$.

Os valores das constantes, x_{nf} e C_{nf} , do modelo para regime laminar são descritos na Tab. 4.20 para cada tipo de nanofluido produzido. Consequentemente, a Fig. 4.51, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de atrito obtidos experimentalmente em escoamento regime laminar e os valores do coeficiente de atrito obtidos por intermédio do modelo proposto descrito pela Eq. 4.11, adotando as constantes de cada tipo de nanofluido apresentadas na Tab. 4.20.

Tabela 4.20 - Constantes do modelo do fator de atrito em regime laminar para as amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste do modelo.

Nanofluido	C_{nf}	x_{nf}	R^2
AG_20	0.5895	0.2262	0.8607
AG_80	0.8819	0.6692	0.7923
Al ₂ O ₃	0.9516	0.9203	0.8661
CNT_800	0.0838	0.1332	0.8253
CNT_300	0.9037	0.8909	0.8147
DO	0.0292	0.9289	0.7915

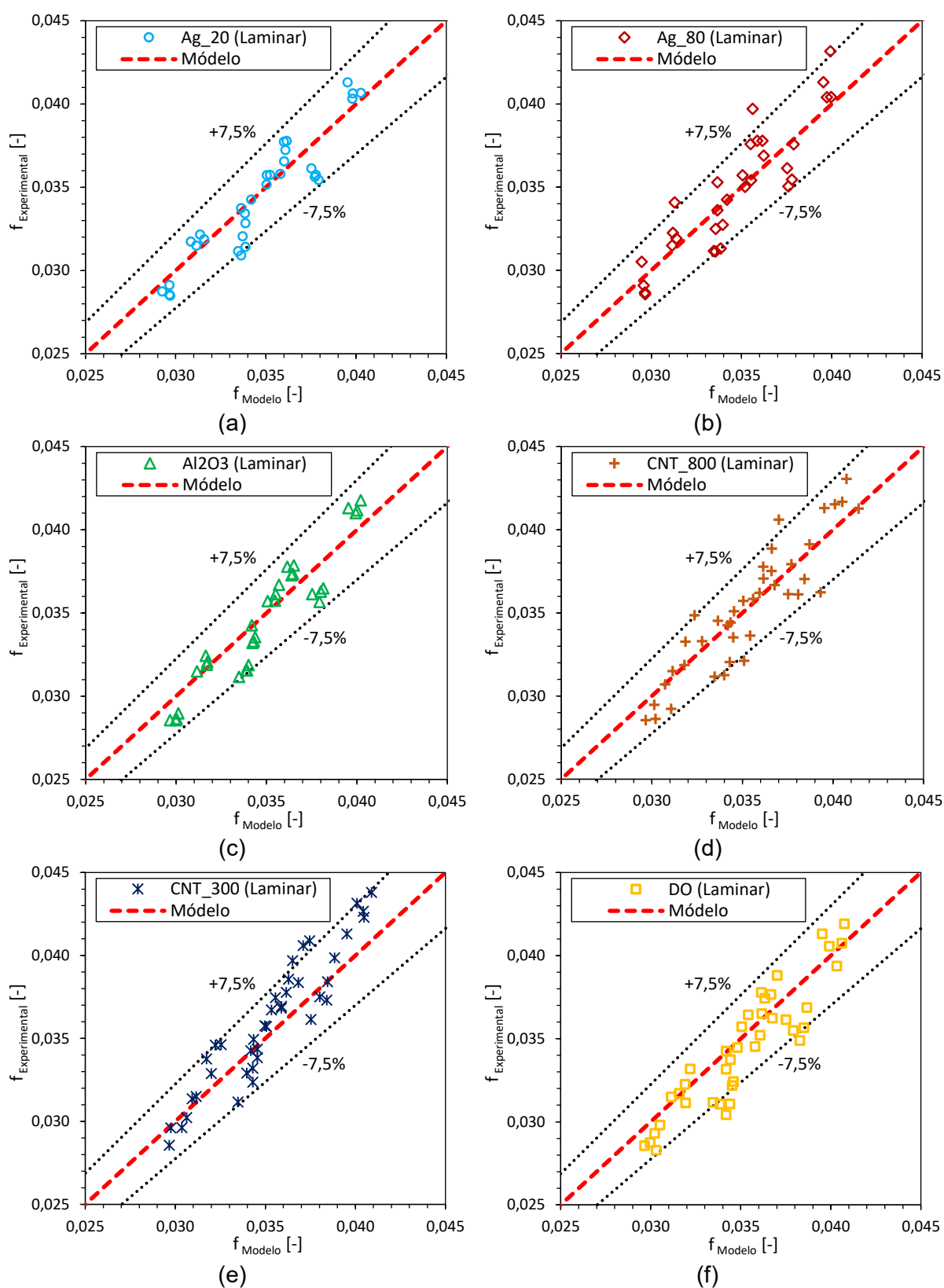


Figura 4.51 - Comparação entre o coeficiente de atrito experimental em regime laminar para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e a correlação proposta. (a) Ag₂₀. (b) Ag₈₀. (c) Al₂O₃. (d) CNT₈₀₀. (e) CNT₃₀₀. (f) DO.

A Tab. 4.21 apresenta, os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais das amostras de nanofluido (H₂O:EG 50:50 wt%). Portanto, a partir da Tab. 4.21 e da Fig. 4.51, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto para a transferência de calor de nanofluidos em escoamento laminar.

Tabela 4.21 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.10.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0,001\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_20	[-]	-0,1%	-1,0%	-2,3%
Ag_80	[-]	-2,0%	4,8%	-0,8%
Al ₂ O ₃	[-]	1,5%	-1,0%	-1,1%
CNT_800	-0,02%	0,01%	0,04%	-0,03%
CNT_300	0,03%	0,01%	0,03%	0,04%
DO	-0,01%	-0,05%	-0,03%	-0,01%

4.10.3. Fator de atrito para amostras de nanofluido a base de (OT-100) em regime laminar

A partir das figuras apresentados na seção 4.6.2 para fator o atrito em regime laminar das amostras de nanofluido a base óleo térmico OT-100, pode ser observado que os pontos experimentais do fator de atrito, apresentam desvios fora da margem de erro de $\pm 35\%$ do modelo teórico utilizado na comparação. Portanto, é proposto um modelo matemático para o fator de atrito em regime laminar que ajuste a dispersão dos resultados experimentais do fator de atrito para as amostras de nanofluido a base óleo térmico OT-100 escoando em tubos horizontais lisos. O modelo matemático utilizado para correlacionar os dados do fator de atrito em regime laminar é consistente com a forma base descrita pela Eq. 4.11.

Onde, C, é igual a 82,3 e o expoente do número de Reynolds, m, é igual a -1,151 para todas as mostras de nanofluido produzidas a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) no presente trabalho. Assim, a correlação é válida para números de Reynolds de $Re \leq 300$, e concentrações de nanopartícula de $0 \leq \phi \leq 0,05\%$.

Os valores das constantes, x_{nf} e C_{nf} , do modelo para regime laminar são descritos na Tab. 4.20 para cada tipo de nanofluido produzido. Consequentemente, a Fig. 4.51, apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de atrito obtidos experimentalmente em escoamento regime laminar e os valores do coeficiente de atrito obtidos por intermédio do

modelo proposto descrito pela Eq. 4.11, adotando as constantes de cada tipo de nanofluido apresentadas na Tab. 4.20.

Tabela 4.22 - Constantes do modelo do fator de atrito em regime laminar para as amostras a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) e indicadores de ajuste do modelo.

Nanofluido	C_{nf}	X_{nf}	R^2
AG_80	8,391	5,678	0.986
CNT_800	2,369	2,586	0.991

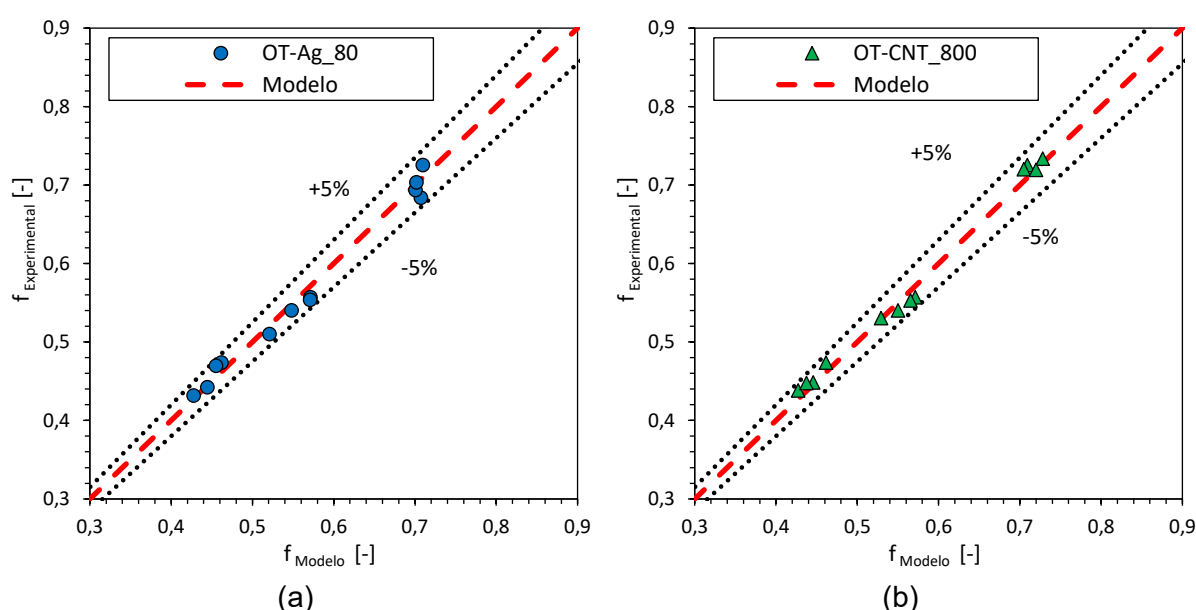


Figura 4.52 - Comparação entre os resultados experimentais do fator de atrito das amostras de nanofluido a base de OT-100 e a correlação proposta (a) OT-Ag_80. (b) OT-CNT_800.

A Tab. 4.21 apresenta, os desvios médios obtidos da comparação entre o modelo proposto e os resultados experimentais das amostras de nanofluido a base de óleo térmico. Portanto, a partir da Tab. 4.21 e da Fig. 4.51, pode ser verificada a boa concordância entre os resultados experimentais com o modelo proposto para a fator de atrito de nanofluidos a base de OT-100 em escoamento laminar.

Tabela 4.23 - Desvio médio dos dados experimentais para o fator de atrito em regime laminar e o modelo de descrito na Eq. 4.10.

Nanofluido	Desvio médio apresentado com a correlação proposta			
	($\phi=0\%$)	($\phi=0,005\%$)	($\phi=0,01\%$)	($\phi=0,05\%$)
Ag_80	-0,7%	2,3%	0,7%	-0,7%
CNT_800	-0,01%	-0,02%	-0,01%	-0,01%

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho experimental, realizado para a avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos, iniciou de uma extensa revisão bibliográfica, que abordou o estado da arte referente aos processos de síntese e produção de dispersões coloidais estáveis, caracterização de propriedades termofísicas e a análise dos métodos de comparação, utilizados na avaliação térmica e fluidodinâmica de nanofluidos. Nessas condições, o presente trabalho, contribuiu para um melhor conhecimento dos mecanismos físicos e parâmetros envolvidos no aumento da transferência de calor em regime laminar e turbulento em escoamento monofásico, no interior de tubos lisos horizontais.

O equipamento experimental inicialmente sofreu algumas modificações, que possibilitaram atingir os requisitos necessários para realização dos ensaios. Consequentemente, uma grande quantidade de dados experimentais foi obtida, possibilitando a realização de diversas análises em termos da transferência de calor e queda de pressão. Portanto, de modo geral, os objetivos propostos para este trabalho foram atingidos satisfatoriamente. A seguir, são apresentadas as principais conclusões relativas ao desenvolvimento da presente pesquisa e, posteriormente, são apresentadas sugestões e recomendações para futuros trabalhos.

5.1. Conclusões Finais

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

➤ Os resultados obtidos das medições de condutividade térmica para as amostras de nanofluido a base da mistura ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) e a base de óleo térmico (OT-100), indicaram incrementos acima das previsões obtidas pela Teoria do Meio Efetivo (EMT), descrita pelo modelo de Maxwell (1873). Assim, foram observados incrementos na condutividade em comparação com o fluido base de até 18,6%, para nanofluidos a base de óleo térmico.

➤ A viscosidade dos nanofluidos foi, também, outro parâmetro determinado experimentalmente, indicando incrementos levemente significativos nas amostras de a base de ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%). A viscosidade das amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100) não apresentou diferenças significativas com os valores obtidos para o próprio fluido base.

➤ O calor específico foi determinado por intermédio de modelos teóricos, que frequentemente é utilizado por um amplo número de pesquisadores. Estas propriedades, concomitantemente com a condutividade térmica e a viscosidade dos nanofluidos fundamentaram a análise dos resultados obtidos para o desempenho termo-hidráulico das amostras de nanofluidos avaliadas.

➤ Embora, nenhuma análise quantitativa foi realizada para avaliar a estabilidade das amostras de nanofluidos produzidos no presente trabalho, a maioria das amostras permaneceram estáveis por até 1 mês, confirmando que o método de dois passos, implementado com o auxílio de sonicação e do homogeneizador de alta pressão, foi bem-sucedido para a produção de nanofluidos.

➤ Os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor em regime turbulento dos testes realizados com os fluidos de referência, água destilada e ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ wt%), foram comparados com o modelo clássico de Gnielinski (1975), apresentando um desvio máximo de 11% e um desvio médio de 4% em relação com o modelo clássico, verificando a validação da bancada experimental.

➤ Os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor em regime laminar dos fluidos de referência, óleo térmico (OT-100) e a mistura ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ wt%), foram comparados com o modelo clássico de Sieder e Tate (1936) apresentando um desvio médio de 15,5% para a mistura ($\text{H}_2\text{O}:\text{EG}$ 50:50 wt%) e de 3,4% para o óleo térmico (OT-100) em

relação com o modelo clássico, verificando a validação da bancada experimental para este regime de escoamento.

➤ O coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%) apresentou incrementos quando comparado ao fluido base destacando que os incrementos foram mais significativos em regime turbulento. Por outro lado, o coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido a base de (OT-100) apresentou incrementos quando comparado ao fluido base, destacando o incremento de 7,7% da amostra OT-CNT_800_3.

➤ Os resultados para o fator de atrito em regime turbulento dos testes realizados com os fluidos de referência, água destilada e (H₂O:EG 50:50 wt%), foram comparados com os modelos clássicos de Blasius e de Petukhov (1970), apresentando desvios em média de 3,4% e 1%, respectivamente.

➤ Os resultados da queda de pressão para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), apresentaram incrementos pouco significativos quando comparados àqueles obtidos para o fluido base. Por outro lado, as amostras de nanofluido a base de OT-100 apresentou uma tendência de diminuição da queda de pressão com a adição de nanopartículas, destacando o decremento de 6,6% para a amostra OT-CNT_800.

➤ Os resultados obtidos para as amostras de nanofluido a base de (H₂O:EG 50:50 wt%), em termos da combinação da transferência de calor e potência de bombeamento, se mostraram satisfatórios nas amostras de nanofluido de prata Ag_80, nanotubo de carbono CNT_800 e diamante DO de maior concentração volumétrica de nanopartícula, dado que, foram obtidos incrementos significativos do coeficiente de transferência de calor próximos de 10% e diferenças pouco significativas da potência bombeamento quando comparada ao fluido base.

➤ Os resultados obtidos para as amostras de nanofluido a base de óleo térmico (OT-100), em termos da combinação da transferência de calor e potência de bombeamento, não se mostrou satisfatório nas amostras de nanofluido de prata OT-Ag_80. Isto devido a que não foram visualizados incrementos significativos na transferência de calor, contudo, apresentando incrementos na potência de bombeamento que foram decrescendo em função da adição de nanopartícula. Este último comportamento foi verificado nas amostras de nanofluido a base de nanotubo de carbono OT-CNT_800 que apresentou uma diminuição na

potência de bombeamento em média de 6,6% para amostra de maior concentração volumétrica de nanopartículas, OT-CNT_800_3, quando comparado ao fluido base (OT-100). Isto, associado aos incrementos obtidos de 7,6% na transferência de calor nesta amostra, a tornam em um nanofluido com ótimo desempenho termo-hidráulico segundo o critério adotado.

➤ Finalmente, foram propostas correlações para as propriedades termofísicas (Condutividade e viscosidade) que modelam o comportamento dos resultados obtidos experimentalmente para todas as amostras de nanofluido produzidas. Nesse sentido, também foram propostas correlações para a transferência de calor e do comportamento fluidodinâmico em regime laminar e turbulento em tubos horizontais lisos na condição de contorno de fluxo calor constante para todas as amostras de nanofluidos produzidas.

5.2. Recomendações a Trabalhos Futuros

A seguir são relacionadas algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos, a fim de contribuir no entendimento das características da transferência de calor de nanofluidos.

➤ Definir critérios de produção e sintetização de nanofluidos, uma vez que, o processo de produção é baseado somente em informações publicadas na literatura ou nas experiências individuais das diferentes pesquisas realizadas do laboratório.

➤ Implementar técnicas quantitativas que detalhem e avaliem o comportamento da homogeneidade e estabilidade das dispersões de nanopartículas nos fluidos base.

➤ Analisar e avaliar experimentalmente a transferência de calor em maiores faixas do regime de escoamento, e analisar o efeito da degradação da amostra de nanofluido na obtenção do coeficiente de transferência de calor.

➤ Realizar testes que possibilitem verificar com maior precisão a composição química e a concentração de nanopartículas nas amostras de nanofluido, durante todas as etapas da avaliação do desempenho termo-hidráulico, isto é, após produzidas, antes dos testes de desempenho termo-hidráulico e após à realização dos testes na bancada experimental.

- Realizar análise reológica das amostras de nanofluidos produzidas para verificar se estas apresentam características de fluido não newtoniano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, D. K.; VAIDYANATHAN, A.; KUMAR, S. S. Synthesis and characterization of kerosene–alumina nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 60, n. 1–2, p. 275-284, 2013. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.049>
- AHMADI, M. H. et al. A review of thermal conductivity of various nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 265, p. 181–188, 2018. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.124>
- AJIBADE, P. A.; MBESE, J. Z. Synthesis and Characterization of Metal Sulfides Nanoparticles/Poly(methyl methacrylate) Nanocomposites. **International Journal of Polymer Science**, v. 2014, p. 1-8, 2014. ISSN 1687-9422. <https://doi.org/10.1155/2014/752394>
- AKOH, H. et al. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. **Journal of Crystal Growth**, v. 45, p. 495-500, December 1978. ISSN 0022-0248. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(78\)90482-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(78)90482-7)
- AMBEKAR, A. S. et al. CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. **Applied Thermal Engineering**, v. 108, p. 999-1007, 2016. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.013>
- 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, July 2010. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.003>
- ANGAYARKANNI, S. A.; PHILIP, J. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 225, p. 146-176, 2015. ISSN 0001-8686. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.08.014>
- ANOOP, K. B. et al. Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 3, p. 034909, 2009. ISSN 0021-8979. <https://doi.org/10.1063/1.3182807>
- ARSHAD, A. et al. A review on graphene based nanofluids: Preparation, characterization and applications. **Journal of Molecular Liquids**, v. 279, p. 444-484, 2019. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.153>

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(a). ISSN 0017-9310. <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, 2018(b). ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.074>

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. 41-46, 2016. ISSN 0735-1933. <https://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, December 2011. ISSN 1674-2001. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2011.03.014>

BABY, T. T.; RAMAPRABHU, S. Synthesis and nanofluid application of silver nanoparticles decorated graphene. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, n. 26, p. 9702-9709, 2011(b). ISSN 10.1039/C0JM04106H. <https://doi.org/10.1039/c0jm04106h>

BABY, T. T.; SUNDARA, R. Synthesis and Transport Properties of Metal Oxide Decorated Graphene Dispersed Nanofluids. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, n. 17, p. 8527-8533, 2011(a). ISSN 1932-7447. <https://doi.org/10.1021/jp200273g>

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.; SHANBEDI, M.; HERIS, S. Z. 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. ISSN 1588-2926. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4048-0>

BERGLES, A. E. ExHFT for fourth generation heat transfer technology. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 26, n. 2-4, p. 335-344, 2002. ISSN 0894-1777. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00145-0)

BLEEKER, E. A. J. et al. **Interpretation and implications of the European Commission Recommendation on the definition of nanomaterial**. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment - Dutch Ministry of Health, Welfare and Sport. [S.l.]. 2012. (RIVM Letter report 601358001).

BÖNNEMANN, H. et al. Monodisperse copper- and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids. **Applied Organometallic Chemistry**, v. 19, n. 6, p. 768-773, March 2005. <https://doi.org/10.1002/aoc.889>

BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571-571, 1952. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>

BRUGGEMAN, D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. **Annalen der Physik**, v. 416, n. 7, p. 636-664, 1935. ISSN 1521-3889. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>

BRUIJN, H. D. The viscosity of suspensions of spherical particles. (The fundamental η - c and ϕ relations). **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**, v. 61, n. 12, p. 863–874, 1942. ISSN 0165-0513. <https://doi.org/10.1002/recl.19420611205>

BUONGIORNO, J. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 109, n. 9, p. 094312, 2009. ISSN 0021-8979. <https://doi.org/10.1063/1.3245330>

CÁRDENAS CONTRERAS, E. M.; OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 132, p. 375-387, 2019. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.014>

CÁRDENAS GÓMEZ, A. O.; HOFFMANN, A. R. K.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 86, p. 277-287, 15 July 2015. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.066>

CÁRDENAS, G. A. O.; PAZ, A. J. G.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental analysis of the thermal-hydraulic performance of water based silver and SWCNT nanofluids in single-phase flow. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 1176-1188, 2017. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.090>

CHADHA, G.; SRIVASTAVA, S. Interfacial layer effect on specific heat of. **Advanced Materials Letters**, v. 8, n. 5, p. 645-649, 2017. <https://doi.org/10.5185/amlett.2017.6378>

CHEN, L. et al. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. **Thermochimica Acta**, v. 477, n. 1-2, p. 21-24, October 2008. ISSN 0040-6031. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.08.001>

CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. **Applied Physics Letters**, v. 91, n. 23, p. 233103, 2007. ISSN 0003-6951. <https://doi.org/10.1063/1.2821117>

CHOI, S. U. S. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S.I.]: ASME. 1995. p. 99-105. <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>

DAI, H. Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties. **Accounts of Chemical Research**, v. 35, n. 12, p. 1035-1044, January 2002. ISSN 0001-4842. <https://doi.org/10.1021/ar0101640>

DEVENDIRAN, D. K.; AMIRTHAM, V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 21-40, 2016. ISSN 1879-0690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.055>

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, January 2006. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009>

DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. **University of California publications in engineering**, v. 2, n. 13, p. 443-461, October 1930. ISSN 0735-1933. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(85\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0735-1933(85)90003-X)

DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, n. 4, p. 706-714, April 2009. ISSN 0894-1777. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.01.005>

DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 1-3, p. January, January 2010. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024>

EASTMAN, J. A. et al. **Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids**. Symposium V – Nanophase and Nanocomposite Materials II. Boston, Massachusetts: MRS Proceedings. 1996. p. 3-11. <https://doi.org/10.1557/PROC-457-3>

EASTMAN, J. A. et al. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied Physics Letters**, v. 78, n. 6, p. 718-720, February 2001. ISSN 0003-6951. <https://doi.org/10.1063/1.1341218>

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>

FILHO, E. P. B. et al. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 261-267, August 2014. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.009>

FONTES, D. H.; RIBATSKI, G.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental evaluation of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage AC of nanofluids of carbon nanotubes and diamond in transformer oil. **Diamond & Related Materials journal**, v. 58, p. 115-121, 2015. ISSN 0925-9635. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.07.007>

FOTUKIAN, S. M.; ESFAHANY, M. N. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute γ -Al₂O₃/water nanofluid inside a circular tube. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 31, n. 4, p. 606-612, August 2010. ISSN 0142-727X. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.020>

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, October 2009. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.029>

GHADIMI, A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, H. S. C. 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. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014>

GIORDANO, C. et al. Metal nitride and metal carbide nanoparticles by a soft urea pathway. **Chemistry of Materials**, v. 21, n. 21, p. 5136-5144, 2009. ISSN 0897-4756. <https://doi.org/10.1021/cm9018953>

GLORY, J. et al. Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes. **Journal of Applied Physics**, v. 103, n. 9, p. 094309, May 2008. ISSN 0021-8979. <https://doi.org/10.1063/1.2908229>

GNIELINSKI, V. Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. **Forschung im Ingenieurwesen A**, v. 41, n. 1, p. 8-16, 1975. ISSN 0015-7899. <https://doi.org/10.1007/BF02559682>

GUIMAREY, M. J. G. et al. Thermophysical properties of polyalphaolefin oil modified with nanoadditives. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 131, p. 192-205, 2019. ISSN 0021-9614. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.10.035>

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, March 2014. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.002>

HAGHIGHI, E. B. et al. Experimental study on convective heat transfer of nanofluids in turbulent flow: Methods of comparison of their performance. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 57, p. 378-387, September 2014. ISSN 0894-1777. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019>

HAMID, K. A. et al. Experimental investigation on heat transfer performance of TiO₂ nanofluids in water–ethylene glycol mixture. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 73, p. 16-24, April 2016. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.009>

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>

HEKMATIPOUR, F.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; SAJADI, B. 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. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.081>

HERIS, S. Z.; ETEMAD, S. G.; NASR, E. M. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 4, p. 529-535, April 2006. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.01.005>

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.

HOFFMANN, A. R. K. **Análise experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono em escoamento monofásico**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 260 f. 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**. [S.l.]: MCGRAW HILL BOOK COMPANY, INC, 1999. Cap. 6, p. 247-294. ISBN: 0072406550

HUANG, D.; WU, Z.; BENGT, S. 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**, Volume, , Pages , ISSN , v. 89, p. 620-626, October 2015. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.082>

HUMINIC, G.; HUMINIC, A. Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-artreview. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 125, p. 82-103, 2018. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.059>

HWANG, Y. et al. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 455, n. 1–2, p. 70-74, 2007. ISSN 0040-6031. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.036>

HWANG, Y. et al. Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. **Powder Technology**, v. 186, n. 2, p. 145-153, August 2008. ISSN 0032-5910. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.020>

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, n. 6348, p. 56-58, November 1991. <https://doi.org/10.1038/354056a0>

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; NARAHARI, M. Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 527, n. 2017, p. 11-22, August 2017. ISSN 0927-7757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.004>

ISA-S5.5. **Graphic Symbols for Process Displays**. [S.l.], p. 48 f. 1986. (0-87664-935-5).

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, May 2017. ISSN 1523-1496. <https://doi.org/10.1002/htj.21210>

JEEVANANDAM, J. et al. Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations.. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 9, n. 1, p. 1050–1074, 2018. ISSN 0953-8984. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>

JIANG, W.; DING, G.; HAO PENG. Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, n. 6, p. 1108-1115, June 2009. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.012>

JIANG, W.; DING, G.; PENG, H. Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, n. 6, p. 1108-1115, 2009. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.012>

KEBLINSKI, P. et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 4, p. 855-863, February 2002. ISSN 0017-9310. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)

KEBLINSKI, P.; EASTMAN, J. A.; CAHILL, D. G. Nanofluids for thermal transport. **Materials Today**, v. 8, n. 6, p. 36-44, June 2005. ISSN 1369-7021. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)70936-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70936-6)

KEDZIERSKI, M. A. Viscosity and density of aluminum oxide nanolubricant. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 4, p. 1333-1340, 2013. ISSN 0140-7007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.017>

KO, G. H. 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, November 2007. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.029>

KOLE, M.; DEY, T. K. Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide gear oil nanofluid. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 50, n. 9, p. 1741-1747, 2011. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.027>

KUMAR, N.; KUMBHAT, S. Carbon-Based Nanomaterials. In: KUMAR, N.; KUMBHAT, S. **Essentials in Nanoscience and Nanotechnology**. 1. ed. [S.I.]: Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Inc, 2016. Cap. 5, p. 189-236. <https://doi.org/10.1002/9781119096122.ch5>

KUMAR, N.; KUMBHAT, S. Nanomaterials. In: KUMAR, N.; KUMBHAT, S. **Essentials in Nanoscience and Nanotechnology**. 1. ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, 2016. Cap. 4, p. 149-182. <https://doi.org/10.1002/9781119096122>

KUMAR, V.; TIWARI, A.; GHOSH, S. Effect of variable spacing on performance of plate heat exchanger using nanofluids. **Energy**, v. 144, n. 1, p. 1107-1119, November 2016. ISSN 0360-5442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.091>

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, May 2013. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.021>

KWAK, K.; KIM, C. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol. **Korea Australia Rheology Journal**, v. 17, n. 2, p. 35-40, June 2005. ISSN 1226-119X.

LAN, Y.; WANG, Y.; REN, Z. F. Physics and applications of aligned carbon nanotubes. **Advances in Physics**, v. 60, n. 4, p. 553-678, August 2011. ISSN 0001-8732. <https://doi.org/10.1080/00018732.2011.599963>

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, February 2007. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.001>

LEE, S. et al. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. **Journal of Heat Transfer**, v. 121, n. 2, p. 280-289, May 1999. ISSN 0022-1481. <https://doi.org/10.1115/1.2825978>

LEE, S. W.; PARK, S. D.; BANG, I. C. Critical heat flux for CuO nanofluid fabricated by pulsed laser ablation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 6908–6915, 2012. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.004>

LI, Y. et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**, v. 196, n. 2, p. 89-101, December 2009. ISSN 0032-5910. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.025>

LI, Y.-H.; QU, W.; FENG, J.-C. Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids. **Chinese Physics Letters**, v. 25, n. 9, p. 3319, 2008. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/25/9/060>

LILEY, P. E.; DESAI, P. D. "Thermophysical Properties of Refrigerants". ASHRAE. [S.l.]. 1993. (1-1883413-10-9).

LIU, M. et al. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 17-18, p. 3028-3033, 2006. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.012>

LIU, Z.-H.; LIAO, L. Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 12, p. 2331-2338, December 2010. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.08.001>

LO, C.-H. et al. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Nanoparticle Research**, v. 7, n. 2-3, p. 313-320, June 2005. ISSN 1388-0764. <https://doi.org/10.1007/s11051-004-7770-x>

LO, C.-H.; TSUNG, T.-T.; CHEN, L.-C. Ni Nano-Magnetic Fluid Prepared by Submerged Arc Nano Synthesis System (SANSS). **JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering**, v. 48, n. 4, p. 750-755, 2005. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.48.750>

MAHBUBUL, I. M. Preparation of Nanofluid. In: MAHBUBUL, I. **In Micro and Nano Technologies, Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid.**

1. ed. [S.l.]: William Andrew Publishing, 2019. Cap. 2, p. 15-45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813245-6.00002-2>

MAHBUBUL, I. M.; SAIDUR, R.; AMALINA, M. A. Latest developments on the viscosity of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 4, p. 874-885, January 2012. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>

MAÏGA, S. E. B. et al. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. **Superlattices and Microstructures**, v. 35, n. 3–6, p. 543-557, March–June 2004. ISSN 0749-6036. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2003.09.012>

MARCUCCI, D. F. **Utilização de nanopartículas de diamante como aditivo lubrificante em sistema de refrigeração**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Uberlândia, p. 60-65. 2018. <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21528>

MASUDA, H. et al. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles. **Netsu Bussei (Japones)**, v. 7, n. 4, p. 227-233, 1993. ISSN 0913-946X. <https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227>

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.; MCKRELL, T. J.; GROTE, K. 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, March 2013. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.074>

MIRKIN, C. A. The beginning of a small revolution. **Small**, v. 1, n. 1, p. 14-16, 2005. ISSN 16136810. <https://doi.org/10.1002/smll.200400092>

MISHRA, P. C. et al. A brief review on viscosity of nanofluids. **International Nano Letters**, v. 4, n. 4, p. 109-120, 2014. ISSN 2008-9295. <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>

MOCHALIN, V. N. et al. The properties and applications of nanodiamonds. **Nature Nanotechnology**, v. 7, n. 1, p. 11-23, 2012. ISSN 17483395. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.209>

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 1, n. 1, p. 3-17, January 1988. ISSN 0894-1777. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X)

MUNYALO, J. M.; ZHANG, X. Particle size effect on thermophysical properties of nanofluid and nanofluid based phase change materials: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 265, p. 77-87, 2018. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.129>

MURSHED, M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. Enhanced thermal conductivity of TiO₂ - Water based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 44, n. 4, p. 367-373, April 2005. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005>

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>

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, n. 5, p. 560-568, May 2008. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004>

NADDAF, A.; HERIS, S. Z. Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 95, p. 116-122, 2018. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.004>

NAMBURU, P. K. et al. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. **Micro & Nano Letters**, v. 2, n. 3, p. 67 - 71, 2007. ISSN 1750-0443. <https://doi.org/10.1049/mnl:20070037>

NAZARI, M.; KARAMI, M.; ASHOURI, M. Comparing the thermal performance of water, Ethylene Glycol, Alumina and CNT nanofluids in CPU cooling: Experimental study. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 57, p. 371-377, September 2014. ISSN 0894-1777. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.003>

NGUYEN, C. T. et al. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 28, n. 6, p. 1492-1506, December 2007. ISSN 0142-727X. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004>

NGUYEN, C. T. et al. Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, n. 2, p. 103-111, February 2008. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.033>

O'HANLEY, H. et al. Measurement and Model Validation of Nanofluid Specific Heat Capacity with Differential Scanning Calorimetry. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1-6, 2012. ISSN 1687-8132. <http://hdl.handle.net/1721.1/72068>

OLIVEIRA, G. A. Síntese e caracterização de nanofluidos de prata. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 101. 2012. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14907>

OLIVEIRA, G. A.; CÁRDENAS CONTRERAS, E. M.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 1450-1456, 2017. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086>

OLIVEIRA, L. R. Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, p. 78-80. 2018. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21077>

PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. **Experimental Heat Transfer**, v. 11, n. 2, p. 151-170, 1998. ISSN 0891-6152. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>

PAS 71:2011. **Nanoparticles. Vocabulary**. British Standards Institution: London. United Kingdom, p. 2-3. 2011. (<https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030214797>).

PATEL, H. E. et al. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. **Applied Physics Letters**, v. 83, n. 14, p. 2931-2933, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1602578>

PAUL, G. et al. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1913–1924, September 2010. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.017>

PETUKHOV, B. S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. **Advances in heat transfer**, New York, v. 6, n. 503, p. 503–565, 1970. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70153-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70153-9)

PHANINDRA, Y.; KUMAR, S. D.; PUGAZHENDHI, S. Experimental Investigation on Al₂O₃ & Cu/Oil Hybrid Nano fluid using Concentric Tube Heat Exchanger. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, Part 2, p. 12142-12150, 2018. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.192>

PHILIP, J.; SHIMA, P. D. Thermal properties of nanofluids. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 183-184, p. 30-45, 2012. ISSN 0001-8686. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.08.001>

POWELL, R. W. Experiments using a simple thermal comparator for measurement of thermal conductivity, surface roughness and thickness of foils or of surface deposits. **Journal of Scientific Instruments**, v. 34, n. 12, p. 485-492, August 1957. <https://doi.org/10.1088/0950-7671/34/12/303>

PRASHER, R. et al. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 23, p. 133108 (1-4), September 2006b. ISSN 0003-6951. <https://doi.org/10.1063/1.2356113>

PRASHER, R.; PHELAN, P. E.; BHATTACHARYA, P. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). **Nano Letters**, v. 6, n. 7, p. 1529-1534, 2006. ISSN 1530-6984. <https://doi.org/10.1021/nl060992s>

QI, D.; CAO, Z.; ZIENE, U. Recent advances in the preparation of hybrid nanoparticles in miniemulsions. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 211, p. 47-62, 2014. ISSN 0001-8686. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.06.001>

SADEGHINEZHAD, E. et al. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 41-51, February 2015. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.006>

SAEEDINIA, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; RAZI, P. Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, p. 152–159, 2012. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.08.001>

SAJADI, A. R.; KAZEMI, M. H. Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 10, p. 1474-1478, December 2011. ISSN 0735-1933. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.007>

SAJID, M. U.; ALI, H. M. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, n. 1, p. 556-592, January 2019. ISSN 1879-0690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057>

SALINAS, S. R. A. Einstein and the theory of the Brownian movement. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo , v. 7, n. 2, p. 263-269, June 2005. ISSN 1806-1117. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000200013>

SATISH, G.; GRANDE, K.; WILLIAM, J. Evolution of Microchannel Flow Passages--Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology. **Heat Transfer Engineering**, v. 24, n. 1, p. 3-17, 2003. ISSN 10.1080/01457630304040. <https://doi.org/10.1080/01457630304040>

SEZER, N.; ATIEH, M. A.; KOÇ, M. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. **Powder Technology**, v. 344, p. 404-431, 2019. ISSN 1873-328X. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.016>

SHAH, J. et al. Surfactant prevented growth and enhanced thermophysical properties of CuO nanofluid. **Journal of Molecular Liquids**, v. 283, p. 550-557, 2019. ISSN 0167-7322. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.127>

SHAHRUL, I. M. et al. Experimental investigation on Al₂O₃–W, SiO₂–W and ZnO–W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger. **International Journal of**

Heat and Mass Transfer, v. 97, p. 547-558, June 2016. ISSN 0017-9310.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.016>

SIEDER, E. N.; TATE, G. E. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 28, n. 12, p. 1429-1435, December 1936. ISSN 0019-7866.
<https://doi.org/10.1021/ie50324a027>

SMALLEY, R. Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge. **MRS Bulletin**, v. 30, n. 6, p. 412-417, 2005. ISSN doi:10.1557/mrs2005.124. <https://doi.org/10.1557/mrs2005.124>

SMOUT, P. D. **VKI Temperature Measurement: Thermocouples Probe Installation and Design Criteria**. Rolls-Royce plc. ed. [S.I.]: Rolls Royce reprint, 1996.

SUNDAR, L. S. et al. Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 37, p. 65-71, February 2012. ISSN 0894-1777.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.10.004>

SUNDAR, L. S.; SINGH, M. K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 23-35, April 2013. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.041>

SUNDAR, L. S.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT–Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 73-83, March 2014. ISSN 0735-1933.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.012>

TIMOFEEVA, E. V. et al. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory. **PHYSICAL REVIEW E**, v. 76, n. 6, p. 061203(1)-061203(16), December 2007. ISSN 1539-3755. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.061203>

TIMOFEEVA, E. V.; ROUTBORT, J. L.; SINGH, D. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 1, p. 014304, 2009. ISSN 0021-8979. <https://doi.org/10.1063/1.3155999>

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K. Specific Heat Measurement of Three Nanofluids and Development of New Correlations. **Journal of Heat Transfer**, v. 131, n. 7, p. 071601/1 - 071601/7, July 2009. ISSN 0022-1481. <https://doi.org/10.1115/1.3090813>

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K.; KULKARNI, D. P. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21-22, p. 4607-4618, October 2010. ISSN 0017-9310.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.032>

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K.; MAHAGAONKAR, B. M. Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison with Theory. **Petroleum Science and Technology**, v. 27, n. 6, p. 612-624, 2009. ISSN 1091-6466. <https://doi.org/10.1080/10916460701857714>

VAN BERKEL, K. Y.; HAWKER, C. J. Tailored composite polymer–metal nanoparticles by miniemulsion polymerization and thiol-ene functionalization. **Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry**, v. 48, n. 7, p. 1594-1606, 2010. ISSN 10.1002/pola.23917. <https://doi.org/10.1002/pola.23917>

VAND, V. Viscosity of Solutions and Suspensions. I. Theory. **The Journal of Physical and Colloid Chemistry**, v. 52, n. 2, p. 277-299, February 1948. <https://doi.org/10.1021/j150458a001>

VERMA, S.; TIWARI, A.; CHAUHAN, D. Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids. **Energy Conversion and Management**, v. 134, p. 103-115, February 2017. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.037>

WAGENER, M.; MURTY, B. S.; GÜNTHER, B. **Preparation of Metal Nanosuspensions by High-Pressure DC-Sputtering on Running Liquids**. Symposium V – Nanophase and Nanocomposite Materials II. [S.I.]: MRS Proceedings. 1996. <https://doi.org/10.1557/PROC-457-149>

WANG, B. X. et al. On the specific heat capacity of CuO nanofluid. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2010, p. 1-4, 2010. ISSN 1687-8132. <https://doi.org/10.1155/2010/172085>

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, January 2007. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>

WANG, X.; MUJUMDAR, A. S. A REVIEW ON NANOFLUIDS - PART II: EXPERIMENTS AND APPLICATIONS. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 631 - 648, December 2008. ISSN 0104-6632. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400002>

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>

WANG, X.-J.; ZHU, D.-S.; YANG, S. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. **Chemical Physics Letters**, v. 40, n. 1-3, p. 107-111, February 2009. ISSN 0009-2614. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2009.01.035>

WARRIER, P.; TEJA, A. Effect of particle size on the thermal conductivity of nanofluids containing metallic nanoparticles. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 1, p. 247(1)-247(6), January 2011. ISSN 1931-7573. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-247>

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. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012>

WILLIAMS, W.; BUONGIORNO, J.; HU, L. Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes. **ASME. Journal of Heat Transfer**, v. 130, n. 4, p. 042412 - 042412-7, 2008. ISSN doi:10.1115/1.2818775. <https://doi.org/10.1115/1.2818775>

WILLIAMS, W.; BUONGIORNO, J.; HU, L.-W. Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes. **Journal of Heat Transfer**, v. 130, n. 4, p. 042412 (1-7), April 2008. <https://doi.org/10.1115/1.2818775>

WU, D. et al. Critical Issues in Nanofluids Preparation, Characterization and Thermal Conductivity. **Current Nanoscience**, v. 5, n. 1, p. 103-112, 2009. ISSN 1573-4137. <https://doi.org/10.2174/157341309787314548>

WU, Z.; SUNDÉN, B. On further enhancement of single-phase and flow boiling heat transfer in micro/minichannels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 11-27, December 2014. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.171>

XIE, C. et al. Structure transition comparison between the amorphous nanosize particles and coarse-grained polycrystalline of cobalt. **Nanostructured Materials**, v. 11, n. 8, p. 1061-1066, November 1999. ISSN 0965-9773. <https://doi.org/10.1063/1.1613374>[https://doi.org/10.1016/S0965-9773\(99\)00394-3](https://doi.org/10.1016/S0965-9773(99)00394-3)

XIE, H. et al. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. **Journal of Applied Physics**, v. 94, n. 8, p. 4967-4971, October 2003. ISSN 0021-8979. <https://doi.org/10.1063/1.1613374>

XUAN, Y.; LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 21, n. 1, p. 58-64, February 2000. ISSN 0142-727X. [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, February 2003. ISSN 0022-1481. <https://doi.org/10.1115/1.1532008>
- XUAN, Y.; LI, Q.; HU, W. Aggregation Structure and Thermal Conductivity. **AIChE Journal**, v. 49, n. 4, p. 1038-1043, April 2003. ISSN 1547-5905. <https://doi.org/10.1002/aic.690490420>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5)
- XUE, Q. Z. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Nanotechnology**, v. 17, n. 6, p. 1655–1660, February 2006. ISSN 0957-4484. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/6/020>
- YANG, L. et al. Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids. **Powder Technology**, v. 317, p. 348-369, 2017. ISSN 0032-5910. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.061>
- YANG, Y. et al. Characterization and Convective Heat Transfer With Nanofluids. **ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference**. Honolulu, Hawaii, USA: Copyright © 2011 by ASME. 2011. p. T30087-T30087-6. <https://doi.org/10.1115/AJTEC2011-44448>
- YU, C.-J. et al. Molecular layering in a liquid on a solid substrate : an X-ray reflectivity study. **Physica B: Condensed Matter** , v. 283, n. 1-3, p. 27-31, June 2000. ISSN 0921-4526. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01885-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01885-2)
- YU, W. et al. Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. **Energy Systems Division** - Argonne National Laboratory. Chicago U.S., p. 78 f. 2007. (ANL/ESD/07-9). <https://doi.org/10.2172/919327>
- YU, W. et al. Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 15-16, p. 3606-3612, July 2009. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.036>
- YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 5, n. 1-2, p. 167-171, 2003. ISSN 1388-0764. <https://doi.org/10.1023/A:1024438603801>
- ZANJANI, H. A. A. M. S. 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, February 2016. ISSN 1290-0729. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.003>

ZENG, Q.; LI, Z.; ZHOU, Y. Synthesis and Application of Carbon Nanotubes. **Journal of Natural Gas Chemistry**, v. 15, n. 3, p. 235-246, September 2006. ISSN 1003-9953. [https://doi.org/10.1016/S1003-9953\(06\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1003-9953(06)60032-7)

ZHONG, H.; LUKES, J. R. Interfacial Thermal Resistance Between Carbon Nanotubes: Molecular Dynamics Simulations and Analytical Thermal Modeling. **Reprinted from Physical Review B**, v. 125403, n. 1, p. 1-10, October 2006. https://repository.upenn.edu/meam_papers/73

ZHU, D. et al. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids. **Current Applied Physics**, v. 9, n. 1, p. 131-139, January 2009. ISSN 1567-1739. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.12.008>

ZHU, H.; LIN, Y.; YIN, Y. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, n. 1, p. 100-103, September 2004. ISSN 0021-9797. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.026>

ZHU, Y. et al. A Simple One-Pot Self-Assembly Route to Nanoporous and Monodispersed Fe₃O₄ Particles with Oriented Attachment Structure and Magnetic Property. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 111, n. 14, p. 5281-5285, 2007. ISSN 1932-7447. <https://doi.org/10.1021/jp0676843>

ZIEBLAND, H. Experimental Determinations of the Thermal Conductivity of Fluids. In: **TYE, R. P. Thermal Conductivity**. London: Academic Press, v. 2, 1969. p. 65-148.

ZUBIR, M. N. M. et al. Experimental investigation on the use of reduced graphene oxide and its hybrid complexes in improving closed conduit turbulent forced convective heat transfer. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 66, p. 290-303, 2015. ISSN 0894-1777. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.022>

APÊNDICE I

Termopares

Os termopares tipo T, foram construídos aplicando uma descarga de arco elétrico nos dois fios do termopar (Cobre / Constatam), fundindo os dois metais e criando a junção. O processo foi controlado pela carga-descarga de um banco de capacitores. Foi utilizada uma câmara que proporcionou uma atmosfera rica em nitrogênio como pode ser visto pela Fig. A1.1, para evitar a oxidação dos metais na junção, que resulta do processo de soldagem.



Figura A1.1 - Elementos utilizados na confecção dos termopares

Para verificar, se os termopares estavam dentro da tolerância de erro inicial de calibração, descritos pela norma ANSI MC96.1-1982 e ASTM E320, (Para termopar tipo T a tolerância máxima padrão é, $E_{max} = \pm 1^\circ\text{C}$). Foram submetidos a testes de propagação de erros. Os cálculos dos erros propagados foram realizados por intermédio das equações descritas na Tab. A1.1, onde σ , representa o desvio padrão. Assim, a Fig. A12 apresenta graficamente as curvas da propagação dos erros na medição do termopar. Portanto, verificou-se que os erros das medições dos termopares, estiveram dentro do estipulado pela norma ANSI MC96.1-1982 e ASTM E320.

Tabela. AI.1 - Modelos para propagação de erros.

Erros	Modelo de calculo
Erro de medição da curva de calibração na ida	$E_{m,ida} = T_{medida} - T_{real}$
Erro de medição da curva de calibração na volta	$E_{m,volta} = T_{medida} - T_{real}$
Propagação de erro de medição na ida (Positivo)	$E_{P,ida+} = E_{m,ida} + 2\sigma$
Propagação de erro de medição na ida (Negativo)	$E_{P,ida-} = E_{m,ida} - 2\sigma$
Propagação de erro de medição na volta (Positivo)	$E_{P,volta+} = E_{m,volta} + 2\sigma$
Propagação de erro de medição na volta (Negativo)	$E_{P,volta-} = E_{m,volta} - 2\sigma$

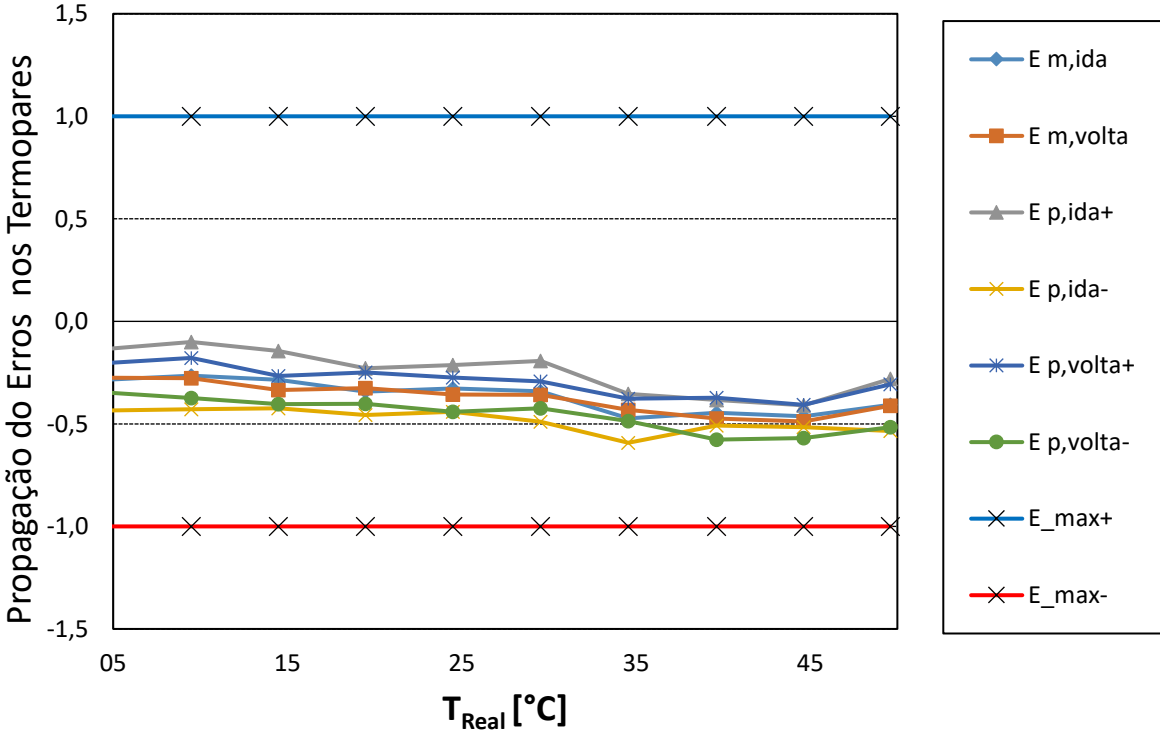


Figura AI.2 - Curvas da propagação dos erros na medição dor termopares tipo T

Os termopares foram calibrados utilizando como referência um conjunto de termômetros de precisão e um banho térmico. O processo de calibração consistiu na inserção dos termopares e do termômetro de precisão em um banho termostático como observado na Fig. A1.3.



Figura A1.3 - Processo de calibração dos termopares

O sinal proveniente dos termopares foi registrado por um sistema de placas de aquisição de dados da National Instruments. Enquanto, ao valor de referência fornecido pelo termômetro de precisão, foi armazenado no programa. Assim as curvas de calibração dos 24 termopares, foram realizadas em uma faixa de temperatura de 5 a 50 °C com incrementos de 5 °C. A temperatura fornecida pelo termômetro de precisão foi considerada a real, T_{real} .

Adotou-se, para a incertezas associadas às medições, um valor baseado no desvio padrão apresentado pela regressão linear da relação de temperaturas. A regressão linear da curva apresentada na Fig. A14, proporcionou a seguinte relação:

$$T_{Termopar} = 0,3043 - 1,0046 \cdot T_{real}$$

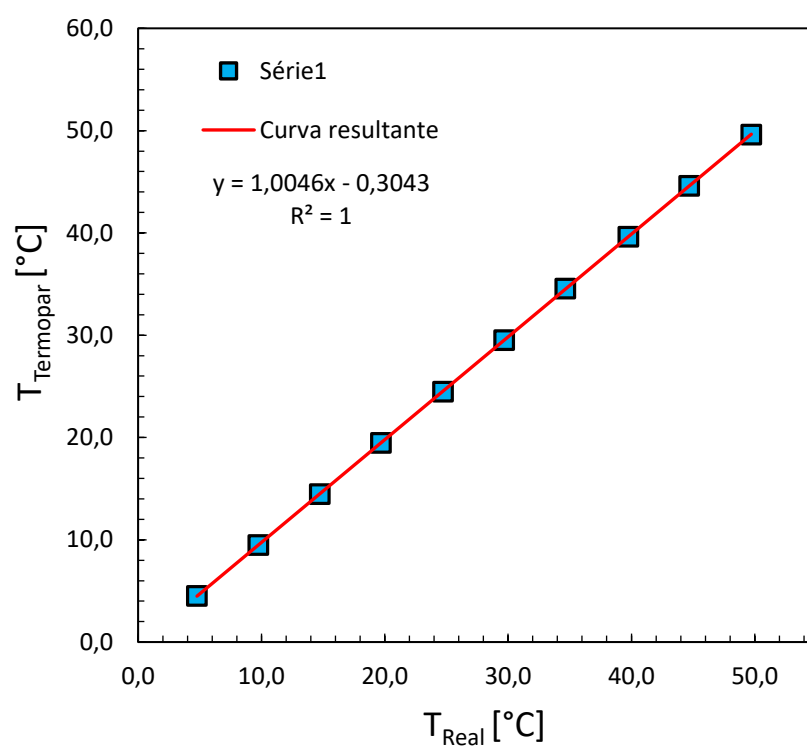
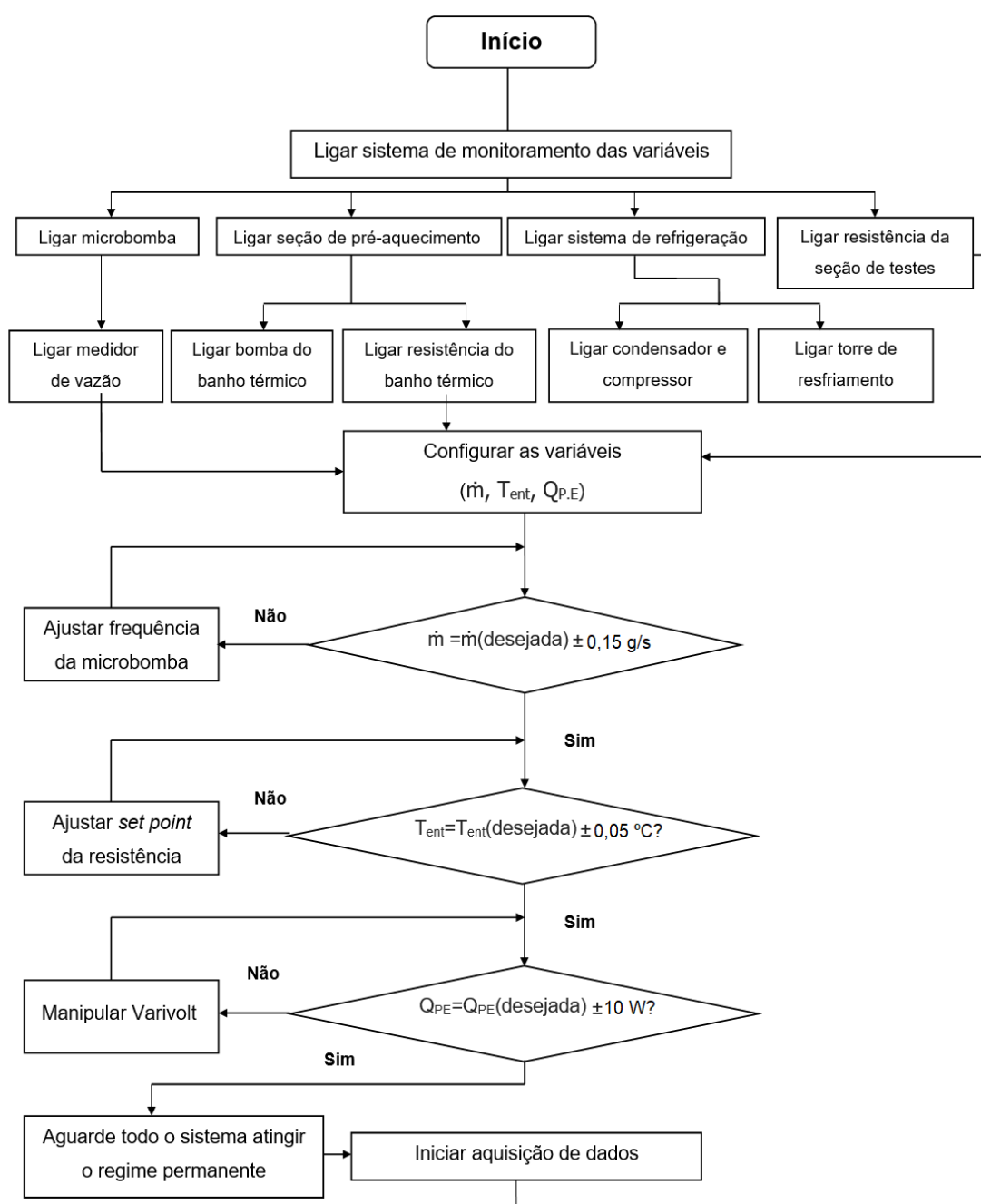
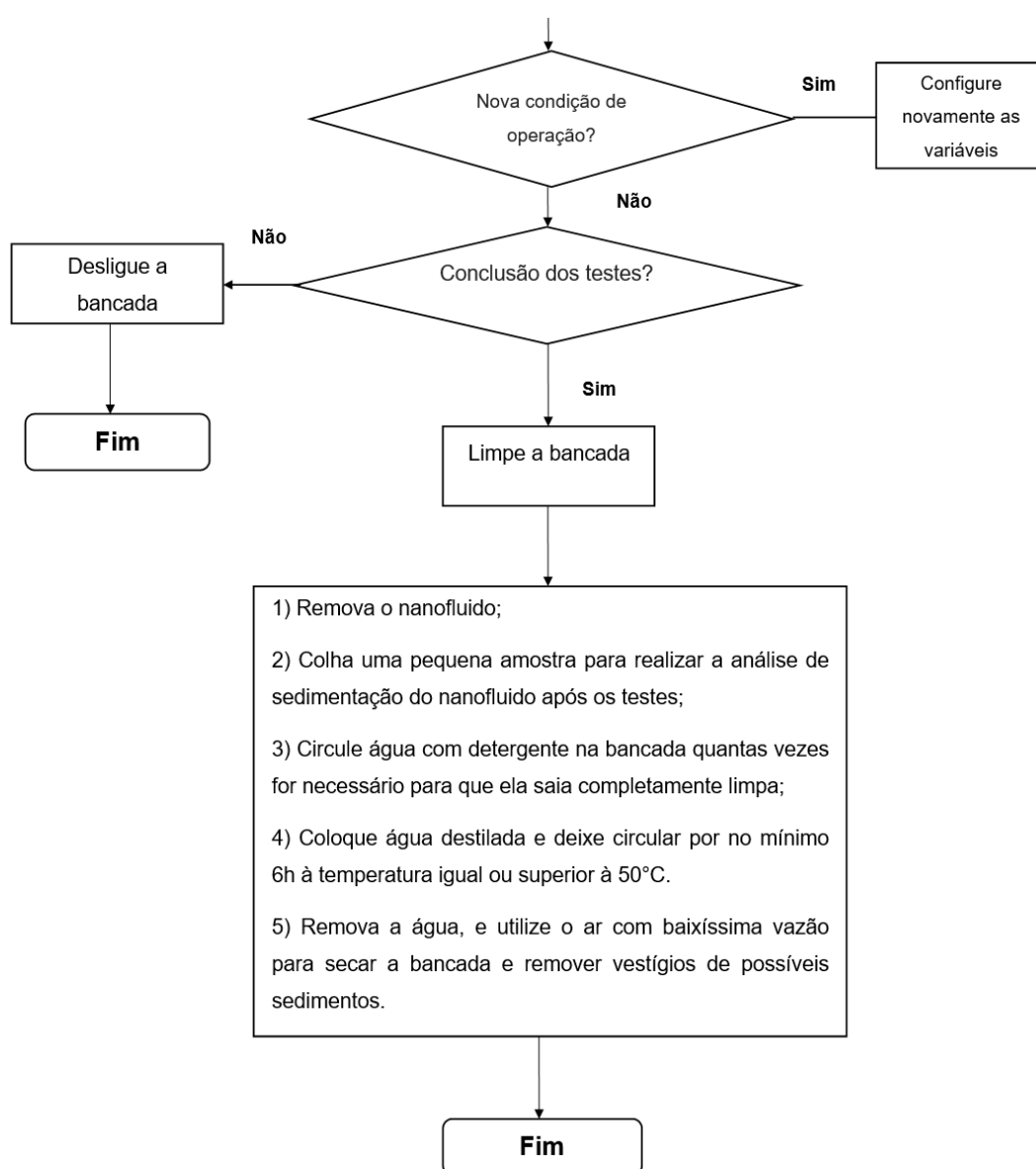


Figura A1.4 - Curva de calibração dos termopares

APÊNDICE II

O referido apêndice traz o fluxograma de operação do equipamento experimental utilizado na avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos, conforme observado a seguir:





APÊNDICE III

Especificações técnicas óleo LUBRAX UTILE OT 100

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	366	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	456	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

APÊNDICE IV

Código para determinar a quantidade de massa de nanopartículas e do fluido base das concentrações volumétricas estabelecidas.

$$T = 25$$

$$P = 100$$

$$C = 50 \quad \text{Concentração mássica de etileno glicol no fluido base [\%]}$$

$$\phi_{V,np} = \frac{\phi_{Vnp;final}}{100} \quad \text{Concentração volumetrica desejada ou final}$$

$$\rho_{np} = \frac{\rho(\text{Silver}; T = T)}{1000} \quad \text{Massa específica da nanopartícula [g/cm³]}$$

$$\rho_{fb} = \frac{\rho(\text{Engine Oil; 25W}; T = T)}{1000} \quad \text{Massa específica do fluido base [g/cm³]}$$

$$m_{np} = \rho_{np} \cdot V_{np} \quad \text{Massa da nanopartícula [g]}$$

$$m_{fb} = \rho_{fb} \cdot V_{fb} \quad \text{Massa do fluido base [g]}$$

$$V_{np} = \phi_{V,np} \cdot V_T \quad \text{Volome da nanopartícula [cm³]}$$

$$V_T = V_{np} + V_{fb} \quad \text{Volome total o final [cm³]}$$

$$M_T = m_{np} + m_{fb} \quad \text{Massa total o final [g]}$$

$$\phi_{m,np} = 100 \cdot \frac{m_{np}}{M_T} \quad \text{Concentração mássica da nanopartícula [\%]}$$

$$\phi_{m;fb} = 100 \cdot \frac{m_{fb}}{M_T} \quad \text{Concentração mássica do fluido base [\%]}$$