

MARCELO COSTA FLORES

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DAS
PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DA
CONVEÇÃO FORÇADA DE NANOFLUÍDO DE
GRAFENO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULTADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2016

MARCELO COSTA FLORES

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS E DA CONVECÇÃO FORÇADA DE NANOFUIDO
DE GRAFENO**

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

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F634i Flores, Marcelo Costa, 1989-
2016 Investigação experimental das propriedades termofísicas e da
convecção forçada de nanofluido de grafeno / Marcelo Costa
Flores. - 2016.
158 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Nanofluidos - Teses. 3. Grafeno -
Teses. 4. Calor - Transmissão - Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone.
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Dedico este trabalho ao amigo Salvo Martins Freire por ter me mostrado que os estudos seriam o melhor caminho para mudar o meu destino.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus pela oportunidade de realizar meu trabalho com cada dia de vida que Ele me concedeu com saúde e felicidade.

Em segundo, posso afirmar que ninguém é vencedor sozinho, por trás de uma vitória não está apenas o nosso desempenho, é a cooperação e o trabalho de muita gente que nos ajudam a vencer. Logo, a todos que colaboraram com minha formação, meu respeito e eterna gratidão.

No entanto, seria ingrato se não reservasse este espaço para agradecer particularmente algumas pessoas que de forma mais atuante contribuíram na minha vida, na minha jornada no mestrado e na minha pesquisa de dissertação.

Aos meus pais, pela benção da minha existência, em especial à minha mãe que muitas vezes renunciou os próprios sonhos para compartilhar comigo os meus.

Às mulheres da minha vida. Minhas irmãs Arla, Luiza e Ariadna que sempre tão carinhosamente me trataram como “filho” sempre contribuindo com tudo que fosse possível para o meu sucesso. À minha amiga e namorada Caroline que tão pacientemente compartilhou comigo meus insucessos, mas não deixou de acreditar no meu potencial.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, que desde o momento que o procurei para desenvolver a pesquisa confiou na minha capacidade. Da sua confiança tenho a maior contribuição científica realizada por mim até o momento, esta dissertação de mestrado.

Ao Prof. Dr. Francisco José de Souza, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia que se tornou para mim exemplo de ética, comprometimento e didática.

Ao meu parceiro de trabalho, o Doutorando Abdul Orlando Cárdenas Gómez, cuja cooperação foi extremamente importante para conclusão desta pesquisa. Ele dedicou seu tempo, conhecimento e trabalho para realizarmos os testes e as modificações na bancada.

Aos membros do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LEST-Nano, Marcos, Arthur, Luís, Edwin, Elena e David que me acolheram cordialmente como mais um membro deste grupo de pesquisa. Em especial à Doutoranda Letícia, por colocar um pouco de “química” nas discussões e por gentilmente me acompanhar nas etapas de preparação e caracterização do nanofluido.

Aos Técnicos do Laboratório, Renato por contribuir no isolamento térmico da bancada e ao Reinaldo pelo conserto dos equipamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

Finalmente, agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia por ter me concedido a oportunidade de realizar um curso de excelência.

FLORES, M. C. **Investigação experimental das propriedades termofísicas e da convecção forçada de nanofluido de grafeno.** 2016. 158 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Este trabalho apresenta a investigação experimental do desempenho termo-hidráulico do nanofluido composto por nanopartículas de grafeno dispersas em uma mistura de água e etilenoglicol numa proporção de 70:30% em volume. Os testes foram realizados sob convecção forçada no interior de um tubo circular com fluxo de calor uniforme na parede para o regime de transição laminar-turbulento. A vazão mássica variou de 40 a 70 g/s correspondendo aos números de Reynolds entre 3000 e 7500. O fluxo de calor foi mantido constante nos valores de 11, 16 e 21 kW/m², assim como, a temperatura de entrada em 15, 20 e 25°C. Foram produzidas três amostras de nanofluido com concentração em volume de 0,05%, 0,10% e 0,15%. Foram determinadas as propriedades termofísicas de todas as amostras que foram criticamente comparadas e discutidas com modelos teóricos mais comumente utilizadas na literatura. Inicialmente, experimentos com água destilada confirmaram a validade do equipamento experimental para os testes termo-hidráulicos. Logo após, as amostras de nanofluido que apresentaram maior condutividade térmica, correspondendo às concentrações em volume de 0,15% e 0,10% foram submetidas aos testes. O desempenho termo-hidráulico para ambas as amostras foi insatisfatório. Os coeficientes de transferência de calor por convecção dos nanofluidos reduziram, em média, para a amostra com $\phi=0,15\%$ em 21% e para a amostra com $\phi=0,10\%$ em 26%. A perda de carga das amostras foi superior ao fluido base. Por fim, a perda de carga e o coeficiente de transferência de calor por convecção das duas amostras também foram comparadas com modelos teóricos. Os modelos utilizados para a perda de carga apresentaram excelente concordância com os resultados experimentais, o que é notável considerando o regime de transição.

Palavras-chaves: Nanofluido, Grafeno, Propriedades termofísicas, Transferência de calor, Convecção, Perda de carga.

FLORES, M. C., **Experimental investigation of thermophysical properties and forced convection of graphene nanofluid.** 2016. 158 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This work presents an experimental investigation of thermal hydraulic performance of the nanofluid composed by graphene nanoparticles dispersed in a mixture of water and ethylene glycol at a ratio of 70:30% by volume. The tests were carried out under forced convection inside a circular tube with uniform heat flux on the wall for the laminar-turbulent transition regime. The mass flow rate ranged from 40 to 70 g/s corresponding to Reynolds numbers between 3000 and 7500. The heat flux was maintained constant at values of 11, 16 and 21 kW/m², as well as the inlet temperature of 15, 20 and 25°C. Three samples were produced with the nanofluid volumetric concentration of 0.05%, 0.10% and 0.15%. Thermophysical properties were experimentaly measured for all samples that were critically compared and discussed with theoretical models most commonly used in the literature. Initially, experiments with distilled water confirmed the validity of the experimental equipment for the thermo-hydraulic tests. Therefore, nanofluid samples that showed the highest thermal conductivity, corresponding to the volumetric concentrations of 0.15% and 0.10%, were subjected to the tests. The thermal-hydraulic performance for both samples was unsatisfactory. The heat transfer coefficients for convection of nanofluids reduced 21% in average, for the sample with $\phi = 0.15\%$ and 26% and for $\phi=0.10\%$. The pressure drop of the samples was higher than the base fluid. Finally, the pressure drop and heat transfer coefficient by convection of both samples were also compared to theoretical models. The models used for pressure drop showed an excellent agreement with experimental results, which is remarkable considering the transitional flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Número de publicações relacionadas ao tópico grafeno.....	4
Figura 1.2 - Número de publicações relacionadas ao tópico nanofluido.....	4
Figura 2.1 - Escala comparativa com nanomateriais.....	7
Figura 2.2 - Número de partículas em escala nanométrica obtidas de uma partícula de 60 μm , cujo diâmetro se assemelha ao do fio de um cabelo humano. Buzea, Blandino e Robbie (2007).....	7
Figura 2.3 - Estrutura do grafeno. Kumar e Lee (2013).....	9
Figura 2.4 - Estruturas obtidas a partir do grafeno, da esquerda para direita: fulereno, nanotubos de carbono e grafite. Geim e Novoselov (2007).....	9
Figura 2.5 - Método para obtenção do grafeno (<i>Scotch-tape</i>). Novoselov (2011).	10
Figura 2.6 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptada de Choi (1998) e Balandin <i>et al.</i> (2008).....	11
Figura 2.7 - Componentes utilizados na produção de nanofluido. Rashmi <i>et al.</i> , (2014)	14
Figura 2.8 - Produção de nanofluido pelo método de um passo.	15
Figura 2.9 - Produção de nanolíquido pelo método de dois passos.	16
Figura 2.10 - Esquema de sistema de arrefecimento para um holofote de LED 450 W usando nanofluido MWCNTs. Thang <i>et al.</i> (2014).....	17
Figura 2.11 - Resposta do sensor às diferentes condições de magnetização; (a) - (c) resposta do sensor com o aumento de magnetização de zero ao valor máximo (35 mT) e (c)	

- (e) resposta do sensor com a diminuição do campo de magnetização do valor máximo para zero. Mahendran e Philip (2013).....	18
Figura 2.12 - Película de ebulação da água pura e do nanofluido de alumina para o mesmo fluxo de calor em um fio de aço inoxidável. Kim <i>et al.</i> (2007).....	19
Figura 2.13 - Movimento de uma partícula num fluido. As linhas indicam as direções sucessivas e aleatórias que a partícula assume (NOTT, 2005)	22
Figura 2.14 - Representação esquemática da camada nanométrica. Adaptada de Kakaç e Pramanjaroenkij (2009).....	23
Figura 2.15 - Aglomeração de nanopartículas. Adaptada de Babu; Babu; Rambabu (2013).	24
Figura 2.16 - Participação em pesquisas de diferentes métodos encontrados na literatura para medição da condutividade térmica de nanofluidos. Paul <i>et al.</i> , (2010).....	30
Figura 3.1 - Etapas básicas para determinação experimental do coeficiente de transferência de calor e da perda de carga para nanofluidos.	44
Figura 3.2 - Imagens obtidas por MET do grafeno que mostram: (a) sua estrutura e (b) sua espessura.	46
Figura 3.3 - Homogeneizador de alta pressão. (a) Equipamento em operação. (b) Esquema do processo de homogeneização.	50
Figura 3.4 - Imagens dos nanofluidos registradas no dia da produção, à esquerda, e após 30 dias, à direita. (a) $\phi=0,05\%$.(b) $\phi = 0,10\%$. (c) $\phi = 0,15\%$	52
Figura 3.5 - Configuração experimental para determinação da condutividade térmica.....	54
Figura 3.6 - Célula de medição da viscosidade dinâmica.....	55
Figura 3.7 - Configuração experimental para determinação da massa específica e da viscosidade dinâmica.....	56
Figura 3.8 - Representação da bancada experimental. a) Resumo do circuito. b) Principais componentes.	57
Figura 3.9 - Posição de instalação dos termopares na parede do tubo da seção de testes.	58

Figura 3.10 - Dimensões da tubulação e da ranhura.....	58
Figura 3.11 - Fixação dos termopares na superfície do tubo. Cárdenas (2015).	59
Figura 3.12 - Fixação das fitas flexíveis na superfície do tubo. Cárdenas (2015).....	60
Figura 3.13 - Equipamentos (Variac, amperímetro e multímetro digital) do sistema de aquecimento da seção de testes.	61
Figura 3.14 - Fixação dos transmissores de temperatura nas extremidades da seção de testes.....	61
Figura 3.15 - Disposição dos equipamentos na seção de testes.....	62
Figura 3.16 - Esquema do Sistema de refrigeração.	63
Figura 3.17 - Sistema de refrigeração.....	64
Figura 3.18 - Circuito para medição da vazão mássica.....	65
Figura 3.19 - Montagem do circuito de pré-aquecimento.	66
Figura 3.20 - Tela do conjunto completo do sistema de aquisição de dados.....	67
Figura 3.21 - Montagem completa do equipamento experimental.	68
Figura 3.22 - Definição dos volumes de controle.	70
Figura 3.23 - Desvio entre o fator de atrito experimental e teórico. (a) Equação de Blasius. (b) Equação de Petukhov.	73
Figura 3.24 - Comparação entre os resultados experimentais e teóricos da perda de carga por unidade de comprimento em função da vazão mássica.....	74
Figura 3.25 - Comparação entre a potência elétrica experimental e o calor transmitido para água determinado teoricamente.	75
Figura 3.26 - Variáveis de um volume de controle necessárias para o cálculo do coeficiente de transferência de calor.	76
Figura 3.27 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais da temperatura média do fluido ao longo da seção de testes para $q'' = 11$ [kW/m ²].	78

Figura 3.28 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais da temperatura média do fluido ao longo da seção de testes para $T_{\text{entrada}} = 15$ [°C].....	79
Figura 3.29 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o obtido por meio do modelo de Gnielinski (1975).	81
Figura 3.30 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o obtido por meio do modelo de Dittus-Boelter (1930).	82
Figura 4.1 - Validação dos resultados experimentais para a massa específica do fluido base (H ₂ O:EG 70:30% vol.).....	85
Figura 4.2 - Massa específica experimental do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) em diferentes concentrações.	85
Figura 4.3 - Comparação entre a massa específica experimental e teórica do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) com concentração de 0,15% vol. de grafeno.	86
Figura 4.4 - Calor específico do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) em diferentes concentrações.	87
Figura 4.5 - Validação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica do fluido base (H ₂ O:EG 70:30% vol.).	88
Figura 4.6 - Viscosidade experimental do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) em diferentes concentrações.	89
Figura 4.7 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido com concentração de grafeno de 0,15% vol.	91
Figura 4.8 - Validação dos resultados experimentais para a condutividade térmica do fluido base (H ₂ O:EG 70:30% vol.).	92
Figura 4.9 - Condutividade térmica do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) em diferentes concentrações.	92
Figura 4.10 - Comparação do incremento da condutividade térmica entre o nanofluido do presente trabalho e o utilizado por Ahammed <i>et al.</i> (2016) para $T=30$ °C.	93
Figura 4.11 - Comparação do incremento da condutividade térmica entre o nanofluido do presente trabalho e o utilizado por Ahammed <i>et al.</i> (2016) para $\phi = 0,1\%$	94

Figura 4.12 - Comparação entre a condutividade térmica experimental e teórica do nanofluido de grafeno/H ₂ O:EG (70:30% vol.) com concentração de 0,15% vol. de grafeno.	95
Figura 4.13 - resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido com $\phi = 0,15\%$ em função da: (a) G (b) Re.....	99
Figura 4.14 - Comparação entre os resultados experimentais do fluido base e do nanofluido com $\phi = 0,15\%$ para: (a) $f \times Re$. (b) $\Delta P/L \times G$	100
Figura 4.15 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para o nanofluido com $\phi = 0,15\%$	101
Figura 4.16 - Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido com $\phi = 0,10\%$ em função de: (a) G (b) Re.....	103
Figura 4.17 - Comparação entre os resultados experimentais do fluido base e do nanofluido com $\phi = 0,10\%$ para: (a) $f \times Re$. (b) $\Delta P/L \times G$	104
Figura 4.18 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para o nanofluido com $\phi = 0,10\%$	105
Figura 4.19 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor do fluido base e das amostras de nanofluido em função da velocidade mássica.....	106
Figura 4.20 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor do fluido base e das amostras de nanofluido em função do número de Reynolds.....	107
Figura 4.21 - Comparação entre a perda de carga do fluido base e das amostras de nanofluido em função da velocidade mássica.....	108
Figura 4.22 - Comparação entre o fator de atrito do fluido base e das amostras de nanofluido em função do número de Reynolds	109
Figura 4.23 - Imagens dos nanofluidos quando submetidos aos testes termo-hidráulicos, à esquerda, e sem submeter-se aos testes, à direita. (a) $\phi = 0,15\%$. (b) $\phi = 0,10\%$	110
Figura 4.24 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para os nanofluidos com $\phi = 0,15\%$ e $\phi = 0,10\%$	111

Figura 4.25 - Comparação do coeficiente de transferência de calor obtido através da correlação de Gnielinski (1975) com os resultados experimentais.....	112
Figura 4.26 - Comparação entre o fator de atrito experimental e teórico obtido pelas correlações: (a) Blasius e (b) Petukhov (1970).	113
Figura 4.27 - Comparação entre a perda de carga experimental e teórica obtida com o auxílio das correlações: (a) Blasius e (b) Petukhov (1970).....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Desempenho do modelo teórico utilizado para o cálculo da massa específica de nanofluidos	33
Tabela 2.2 - Fator de forma proposta para diferentes nanopartículas	38
Tabela 2.3 - Modificação dos modelos teóricos para determinação da viscosidade de nanofluidos	38
Tabela 2.4 - Trabalhos experimentais sobre transferência de calor por convecção forçada com nanofluidos de grafeno.....	41
Tabela 3.1 - Propriedades da solução de grafeno/água.....	45
Tabela 3.2 - Definição dos volumes necessários para produção dos nanofluidos.....	49
Tabela 3.3 - Concentração das amostras de nanofluido após produção.....	51
Tabela 3.4 - Condições adotadas para os testes com água destilada.....	69
Tabela 4.1 - Comparação entre a massa específica experimental e teórica do nanofluido para T=30 °C.	86
Tabela 4.2 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido para T=30 °C.	90
Tabela 4.3 - Comparação entre a condutividade térmica experimental e teórica do nanofluido para T=30 °C.	95
Tabela 4.4 - Parâmetros operacionais dos testes termo-hidráulicos com nanofluidos.....	96
Tabela 4.5 - Considerações para avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos. ..	98
Tabela 4.6 - Condição de operação para avaliação entre as amostras de nanofluido.....	106

Tabela 4.7 - Concentração das amostras de nanofluido após os testes termo-hidráulicos.	109
Tabela B.1 - Incerteza dos parâmetros primários.....	134
Tabela B.2 - Incerteza obtida para os parâmetros secundários.	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

<i>A</i>	área superficial [m^2]
<i>b</i>	coeficiente angular
<i>c_p</i>	calor específico à pressão constante [$kJ/kg\text{ }^\circ C$]
<i>d</i>	diâmetro médio da nanopartícula [nm]
<i>D</i>	diâmetro interno do tubo [m]
<i>D/L</i>	fator de forma
<i>DR</i>	desvio relativo
<i>e</i>	espessura [mm]
<i>E</i>	erro
<i>EG</i>	etilenoglicol
<i>G</i>	velocidade mássica [kg/sm^2]
<i>h</i>	coeficiente de transferência de calor [$W/m^2\text{ }^\circ C$]
<i>H₂O</i>	água destilada
<i>I</i>	corrente [A]
<i>k</i>	condutividade térmica [$W/m\text{ }^\circ C$]
<i>l</i>	comprimento da nanopartícula [mm]
<i>ln</i>	logarítmico natural
<i>L</i>	comprimento do tubo [m]
<i>m</i>	massa [kg]
<i>m̄</i>	vazão mássica [kg/s]
<i>n</i>	número de volumes de controle
<i>P</i>	pressão [Pa]
<i>pH</i>	potencial hidrogeniônico
<i>q''</i>	fluxo de calor [W/m^2]

q	densidade linear de potência [W/m]
Q	taxa de transferência de calor [W]
r	distância radial [m]
R	resistência térmica [$W/\text{ }^{\circ}C$]
t	tempo [s]
T	temperatura [$\text{ }^{\circ}C$]
V	volume [m^3]
V	voltagem [V]
x	distância axial [m]
Y	propriedade termofísica/termohidráulica geral
W_B	potência de bombeamento [W]
wt	concentração mássica

Letras gregas

α	difusividade térmica [m^2/s]
ΔP	perda de carga [Pa]
ΔT	diferença de temperatura [$\text{ }^{\circ}C$]
μ	viscosidade dinâmica [$Pa.s$]
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

f	fator de atrito
Nu	número de Nusselt
Pr	número de Prandtl
Re	número de Reynolds

Abreviações

EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
LESTnano	Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
THW	<i>Transient Hot Wire</i>

Subscritos

<i>ad</i>	adicionado
<i>BE</i>	balanço de energia
<i>PE</i>	potência elétrica
<i>nf</i>	nanofluido
<i>np</i>	nanopartícula
<i>exp</i>	experimental
<i>fb</i>	fluído base
<i>p</i>	parede
<i>e</i>	entrada
<i>s</i>	saída
<i>sol</i>	solução
<i>x</i>	posição local
<i>int</i>	interno
<i>ext</i>	externo
<i>Acr</i>	volume que deve ser acrescido
<i>Red</i>	volume que deve ser reduzido
<i>final</i>	quantidade total
<i>ef</i>	efetiva
<i>ref</i>	referência
<i>m</i>	médio

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I - Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Justificativas.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Contribuição do trabalho	3
1.5. Organização da dissertação.....	5
2. CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. Nanomateriais	6
2.1.1. Carbono	8
2.2. Nanofluidos	11
2.2.1. Produção de nanofluidos	13
2.2.2. Aplicação de nanofluidos	16
2.3. Parâmetros que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos	20
2.3.1. Tamanho	21
2.3.2. Área superficial específica	21
2.3.3. Mecanismos de transferência de calor.....	21
2.3.4. Temperatura	25
2.3.5. Concentração	25
2.3.6. Condutividade térmica do fluido base	26
2.3.7. Surfactantes	26
2.3.8. pH.....	26
2.4. Parâmetros que influenciam a viscosidade dinâmica dos nanofluidos.....	27
2.4.1. Tamanho e forma da nanopartícula	27
2.4.2. Concentração	28
2.4.3. Temperatura	28
2.4.4. Efeito do pH.....	28

2.4.5. Tempo de dispersão	29
2.5. Técnicas de medição	29
2.5.1. Condutividade térmica	29
2.5.2. Viscosidade	31
2.6. Correlações para estimar as propriedades termofísicas.....	32
2.6.1. Massa específica	32
2.6.2. Calor específico	34
2.6.3. Condutividade térmica	35
2.6.4. Viscosidade	36
2.7. Transferência de calor por convecção e perda de carga	39
2.8. Regime de transição laminar-turbulento.....	42
3. CAPÍTULO III - Metodologia.....	43
3.1. Produção de nanofluidos.....	45
3.2. Medição das propriedades termofísicas	53
3.2.1. Método transiente do fio quente.....	53
3.2.2. Viscosímetro	55
3.3. Bancada experimental.....	56
3.3.1. Seção de testes	58
3.3.2. Sistema de refrigeração.....	62
3.3.3. Sistema para medição da vazão mássica	64
3.3.4. Sistema de pré-aquecimento	65
3.3.5. Medição, monitoramento e aquisição de dados	66
3.4. Validação da bancada experimental.....	68
3.4.1. Volumes de controle	70
3.4.2. Fator de atrito e perda de carga.....	72
3.4.3. Isolamento da seção de testes	75
3.4.4. Coeficiente de transferência de calor.....	76
3.4.5. Conclusão da validação da bancada	82
4. CAPÍTULO IV - Resultados	83

4.1. Propriedades Termofísicas.....	83
4.1.1. Massa específica	84
4.1.2. Calor específico	87
4.1.3. Viscosidade dinâmica	88
4.1.4. Condutividade Térmica	91
4.2. Avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos	96
4.2.1. Amostra 1	98
4.2.2. Amostra 2	102
4.2.3. Avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos para determinada condição de operação.....	105
4.2.4. Comparação dos resultados termo-hidráulicos com correlações	111
5. CAPÍTULO V - Conclusões e Sugestões	115
5.1. Conclusões	115
5.2. Sugestões	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICE A - Fluxograma de Operação da Bancada Termo-hidráulica.....	132
APÊNDICE B - Análise da Propagação de Incertezas	134

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os fluidos de transferência de calor convencionais como água, etilenoglicol e óleo mineral desempenham um importante papel em vários setores da indústria, como por exemplo, na geração de energia e no resfriamento de componentes microeletrônicos. Porém, eles possuem reduzida condutividade térmica.

Esforços têm sido realizados pela busca de fluidos térmicos com melhor desempenho que proporcionem menor consumo de energia e torne os processos industriais mais eficientes. Uma das alternativas propostas é a suspensão de partículas sólidas de tamanho nanométrico (1 ~ 100nm) em fluidos convencionais. Estas suspensões, denominadas de nanofluido tem se comportado como uma nova classe de fluidos térmicos que despertou o interesse de diversos pesquisadores por apresentar uma condutividade térmica superior aos fluidos tradicionais.

Os trabalhos experimentais e teóricos têm relatado que os nanofluidos podem potencializar os processos de troca térmica, permitindo seu uso em diversas áreas como transferência de calor e eletrônica. Pesquisas recentes já avaliam a aplicação na indústria farmacêutica, de cosméticos e na medicina.

Porém, apesar de seu grande potencial na intensificação de troca térmica, essa tecnologia ainda se encontra em desenvolvimento, pois falta o conhecimento do comportamento das suas propriedades termofísicas nos efeitos sobre a transferência de calor e a perda de carga. Portanto, trabalhos experimentais que contribuam com a base de dados destas propriedades são importantes para ampliar o conhecimento e definir as possíveis aplicações.

A revisão da literatura sobre os resultados de trabalhos experimentais de nanofluido de grafeno mostra que poucos estudos fornecem estimativas quantitativas sobre um conjunto completo de condições experimentais. Além disso, alguns problemas têm sido relatados com a utilização de nanofluido de grafeno em aplicações reais. Deste modo, este trabalho é motivado pela avaliação experimental do nanofluido de grafeno a fim de obter resultados que permitam esclarecer o seu desempenho termo-hidráulico, além disso, contribuir com o banco de dados de nanofluidos e determinar possíveis aplicações.

1.2. Justificativas

- Muitos estudos experimentais sobre a condutividade térmica de nanofluidos a base de grafeno estão disponíveis na literatura; porém os estudos sobre a transferência de calor por convecção são limitados (AGARWAL; VAIDYANATHAN; KUMAR, 2016).
- A revisão da literatura mostra que poucos pesquisadores têm trabalhado com a mistura de etilenoglicol e água como fluido base.
- Nanofluidos têm mostrado características promissoras, como aumento significativo da condutividade térmica, assim pode ser uma alternativa aos fluidos de transferência de calor convencionais em uma variedade de aplicações. No entanto, há contradições em resultados de diferentes pesquisas e indisponibilidade de um concreto mecanismo para explicar como as propriedades aumentam a transferência de calor (RASHMI *et al.*, 2014).
- O nanofluido de grafeno/etilenoglicol é um potencial fluido de transferência de calor, pois, apresenta maior condutividade térmica do que o fluido base. No trabalho de Yu *et al.* (2011) a condutividade térmica do fluido base teve um incremento de 86% para uma concentração de 5 % em volume de grafeno.
- O estudo do impacto do nanofluido sobre a perda de carga em um sistema é essencial, pois é um importante fator na determinação da sua aplicabilidade (HAMID *et al.*, 2015).
- Grande parte dos estudos com nanofluido de grafeno focam na determinação das varáveis que afetam a taxa de transferência de calor (AHAMMED *et al.*, 2015; BABY e RAMAPRABHU, 2011; BALANDIN *et al.*, 2008; ZANJANI *et al.*, 2016). Poucos trabalhos experimentais relatam de forma mais abrangente a relação que existe entre a perda de carga e a taxa de transferência de calor.

1.3. Objetivos

Utilizando nanofluido de grafeno disperso em uma mistura de água e etilenoglicol, este trabalho pretende, por intermédio de um estudo experimental, determinar as suas propriedades termofísicas, bem como, obter os demais parâmetros necessários que permitam avaliar o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga. Assim, uma bancada experimental elaborada para o escoamento forçado de fluidos no interior de um tubo circular foi utilizada para tal finalidade.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver o conhecimento sobre nanofluidos através de uma revisão bibliográfica pertinente no que diz respeito às propriedades termofísicas e mecanismos que envolva transferência de calor e a perda de carga;
- Obter dados experimentais das propriedades termofísicas (condutividade térmica, viscosidade, massa específica e calor específico);
- Comparar os resultados experimentais com outros trabalhos encontrados na literatura para a perda de carga e a transferência de calor.
- Avaliar as correlações propostas para estimação das propriedades termofísicas de nanofluidos;

1.4. Contribuição do trabalho

Entre os materiais disponíveis para produção de nanofluido, o grafeno merece destaque devido à sua elevada condutividade térmica. Porém, outras propriedades como transparência, resistência, elasticidade e impermeabilidade também tem sido estudadas por outras áreas da engenharia. A expressiva quantidade de publicações de países com elevado desenvolvimento tecnológico evidencia a importância que este material possui. No entanto, desde 2010 (quando Andre Geim e Konstantin Novoselov receberam o prêmio Nobel de Física por experimentos inovadores com grafeno) até 2015 (quando a revisão deste trabalho estava sendo realizada), enquanto o número de publicações relacionadas ao grafeno aumentava exponencialmente em outros países, a Fig. 1.1 mostra que o Brasil continuou praticamente estagnado.

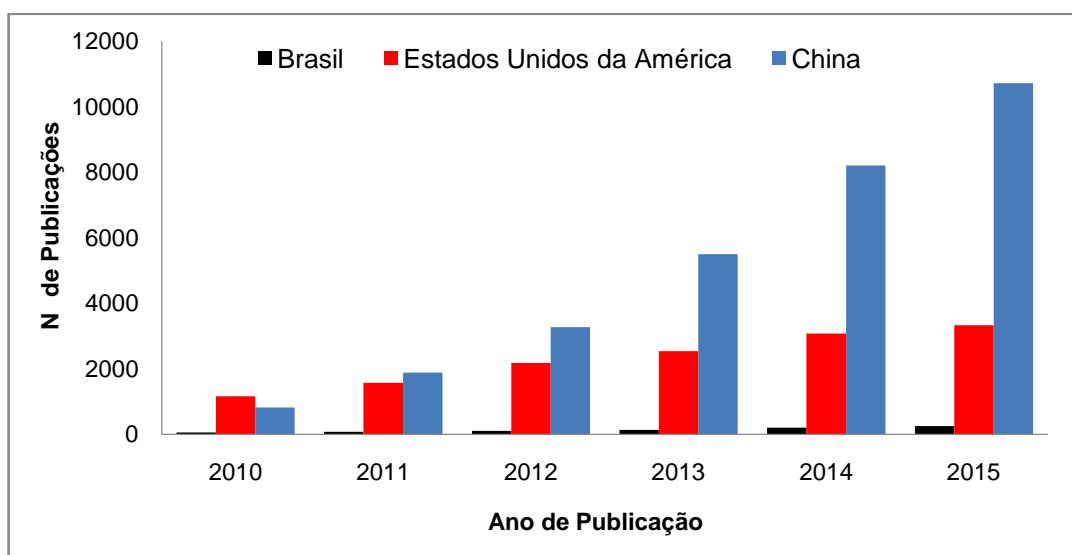


Figura 1.1 - Número de publicações relacionadas ao tópico grafeno.

Fonte: Web of Science.

No Brasil a situação de estudos com nanofluido é a mesma observada para o grafeno, apesar da importância que a comunidade científica tem dado ao nanofluido, o número de publicações no país é inexpressiva. No entanto, o laboratório onde este trabalho foi realizado, o Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LESTnano) tem dado a sua contribuição. A Figura 1.2 mostra que em 2014, das mais de 1000 publicações, o Brasil contribui com apenas três, sendo que uma delas foi desenvolvida no LESTnano. Em 2015, o cenário não mudou, entretanto o laboratório continuou colaborando com duas publicações.

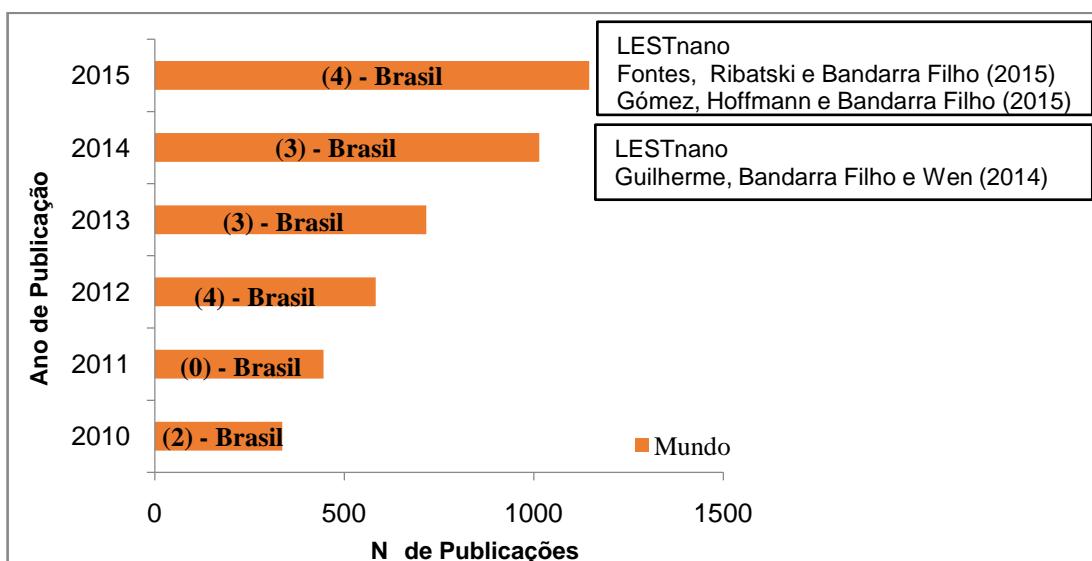


Figura 1.2 - Número de publicações relacionadas ao tópico nanofluido.

Fonte: Web of Science.

Assim ao utilizar grafeno para produção de nanofluido, este trabalho pretende continuar inovando e contribuindo com o desenvolvimento tecnológico do Brasil. Além disso, a avaliação da capacidade de transferência de calor e da perda de carga de um nanofluido ainda pouco estudado contribuirá com o banco de dados de nanofluidos. Um maior número de dados pode contribuir para a padronização dos métodos de medição das propriedades dos nanofluidos, o que tem se mostrado essencial para avaliar o verdadeiro potencial da aplicação de nanofluidos em processos de transferência de calor.

1.5. Organização da dissertação

As etapas necessárias para realização deste estudo foram distribuídas em cinco capítulos, cada um subdividido em seções e subseções que abordam de maneira detalhada os aspectos mais relevantes.

No capítulo II, a revisão bibliográfica aborda o conceito de nanomateriais. Na sequência, de forma sistemática, apresenta-se o carbono e o grafeno até chegar à definição de nanofluido. Logo após, é apresentado os métodos de produção e aplicações na engenharia com nanofluidos. Um maior destaque é dado para as duas principais propriedades termofísicas dos nanofluidos, a condutividade térmica e a viscosidade. São apresentados também os principais modelos para estimar as propriedades termofísicas dos nanofluidos. Por fim, apresenta-se uma revisão sobre os trabalhos mais recentes com nanofluido de grafeno à respeito da transferência de calor e da perda de carga.

O capítulo III, destinado à metodologia, relata o método utilizado neste trabalho para produzir o nanofluido e a descrição do equipamento. É apresentada também a bancada experimental e os seus componentes. Posteriormente, pode-se verificar a validação da bancada que foi realizada com água destilada.

No capítulo IV, são apresentados os resultados referentes às propriedades termofísicas do nanofluido de grafeno. Também foi realizada a comparação dos resultados do presente trabalho com os obtidos por outros autores que utilizaram grafeno. Em sequência é apresentado o desempenho do nanofluido em comparação com o fluido base (mistura água e etilenoglicol numa concentração 70:30 em volume) para verificar possíveis incrementos na perda de carga e na transferência de calor. As conclusões são apresentadas no capítulo V, elas discorrem sobre as principais observações dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a definição dos objetivos deste trabalho e com o intuito de situar o leitor a respeito das abordagens que serão realizadas, a revisão bibliográfica foi baseada nos seguintes tópicos:

- Nanomateriais;
- Parâmetros que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos;
- Parâmetros que influenciam a viscosidade dinâmica dos nanofluidos;
- Correlações para estimar as propriedades termofísicas;
- Transferência de calor por convecção e perda de carga;
- Regime de transição laminar-turbulento.

2.1. Nanomateriais

A definição do termo nanomaterial baseia-se exclusivamente no tamanho das partículas constituintes de um material. Por nanomaterial, ou materiais organizados à nanoescala, entende-se um material natural, incidental ou fabricado cujas dimensões externas apresentam-se na gama de tamanhos compreendidos entre 1 nm e 100 nm. A Figura 2.1 mostra alguns materiais que se apresentam na escala nanométrica e a comparação relativa com outros materiais comumente conhecidos.



Figura 2.1 - Escala comparativa com nanomateriais.

A elevada área específica dos nanomateriais destaca-se entre os diversos fatores responsáveis pela especificidade das suas propriedades, pois à medida que o tamanho de um material diminui maior torna-se a sua área superficial específica (relação área/massa) o que facilita a realização de fenômenos físicos e químicos. Considere uma micropartícula de carbono com um diâmetro de 60 µm que possui uma massa de 0,3 µg e uma área superficial de 0,01 mm². Se cada partícula de carbono possuísse um diâmetro de 60 nm, a Fig. 2.2 ilustra que a mesma massa de carbono teria uma área de superfície de 11,3 mm².

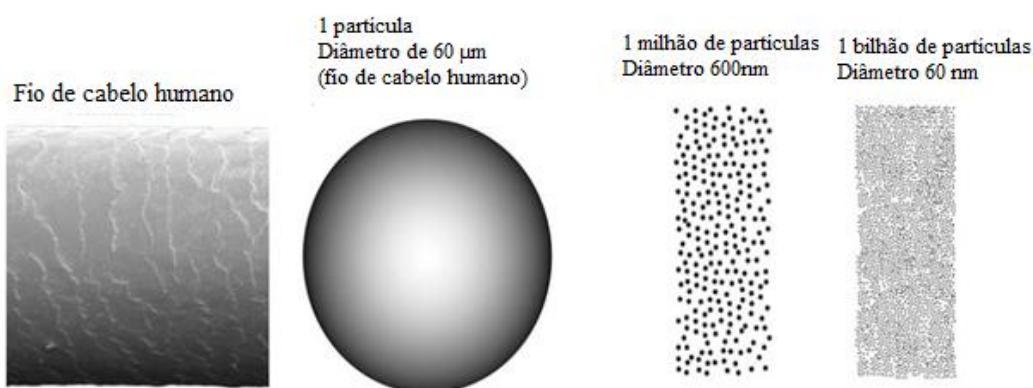


Figura 2.2 - Número de partículas em escala nanométrica obtidas de uma partícula de 60 µm, cujo diâmetro se assemelha ao do fio de um cabelo humano. Buzea, Blandino e Robbie (2007).

Assim, as propriedades óticas, elétricas, mecânicas, magnéticas e químicas dos materiais podem ser manipuladas de forma controlada ajustando o tamanho.

Uma diversidade de materiais muito importante para a ciência e a engenharia que estão sendo sintetizados em escala nanométrica cujos resultados experimentais e teóricos tem se mostrado interessantes são os nanomateriais constituídos de carbono.

2.1.1. Carbono

A abundância do carbono na natureza e sua versatilidade tornaram-no um dos materiais mais estudados por pesquisadores, tanto é que existe a especialidade da química dedicada apenas aos seus compostos. Os orbitais 2s e 2p por apresentarem menor energia de ligação e por serem capazes de se sobrepor são responsáveis por conferir ao carbono propriedades específicas.

No seu estado fundamental, o carbono só poderia realizar apenas duas ligações covalentes simples, pois a camada de valência apresenta um orbital s preenchido e dois orbitais p (p_x e p_y) com apenas um elétron. No entanto, estes orbitais conseguem se sobrepor, ou em outras palavras, hibridizar-se.

A primeira forma de hibridização do carbono é formada quando os orbitais s, p_x , p_y e p_z hibridizam e formam quatro novos orbitais denominados sp^3 devido à hibridização de um orbital s e três orbitais p. Os novos orbitais sp^3 formados permitem então que o átomo de carbono faça quatro ligações covalentes simples, denominadas ligações sigma (σ).

O orbital híbrido sp^2 é formado quando apenas os orbitais s, p_x , e p_y hibridizam e formam três novos orbitais. O orbital p_z não é alterado em sua forma, mas recebe um elétron utilizado para formar ligações entre orbitais p, conhecida como ligação pi (π).

Finalmente, a hibridização sp é feita pela combinação de um orbital s e o orbital p_x formando dois orbitais híbridos sp .

Portanto, devido à hibridização dos orbitais moleculares (sp , sp^2 , sp^3) é possível obter materiais com configurações estruturais diferentes formados com o mesmo elemento; este fenômeno conhecido como alotropia é responsável pelas diferentes características observadas, por exemplo, entre os alótropos diamante e grafite, ambos, apesar de serem constituídos apenas de átomos de carbono apresentam propriedades completamente distintas devido à diferença do arranjo formado entre os seus átomos. Enquanto o diamante possui elevada dureza e é transparente, o grafite é macio e escuro (GARCIA, LUCAS e BINATTI, 2015).

Dentre os alótropos do carbono pode-se citar ainda o grafeno, do qual são obtidos o fulereno, os nanotubos de carbono e a grafite.

Grafeno

O grafeno é formado por átomos de carbono que, por possuírem a hibridização do tipo sp^2 , conseguem se organizar numa estrutura planar formada por hexágonos regulares (“favo de mel”) apresentando-se como uma rede bidimensional (2D) como mostra a Fig. 2.3. O resultado desta distribuição é a obtenção de um material com características ópticas, mecânicas e térmicas únicas (KUMAR; LEE, 2013).

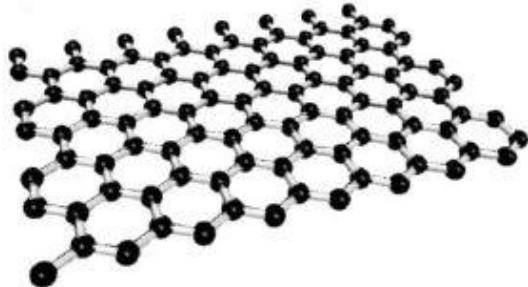


Figura 2.3 - Estrutura do grafeno. Kumar e Lee (2013).

A folha de grafeno (2D) pode ser estruturada em uma geometria circular para se obter o fulereno (0D), enrolada como nanotubos de carbono (1D) ou empilhadas para formar o grafite (3D). A Figura 2.4 ilustra esta maleabilidade que grafeno dispõe.

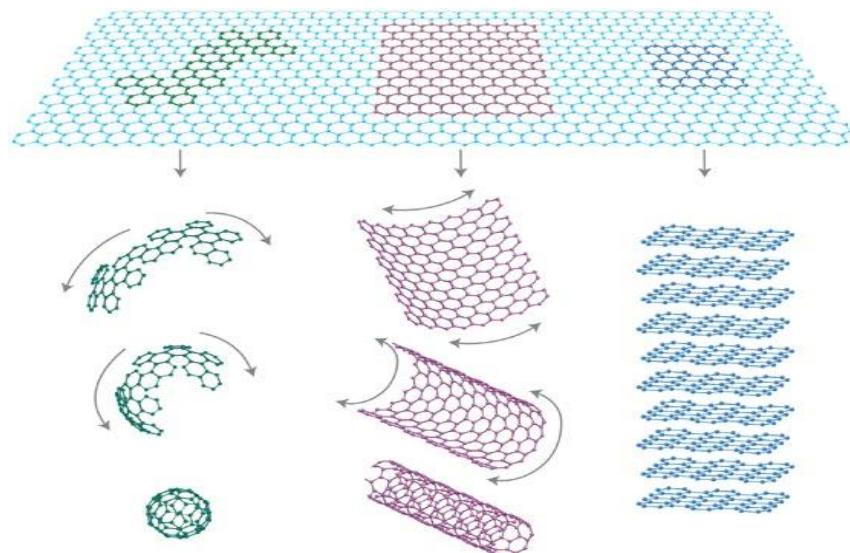


Figura 2.4 - Estruturas obtidas a partir do grafeno, da esquerda para direita: fulereno, nanotubos de carbono e grafite. Geim e Novoselov (2007).

O grafeno é um material conhecido há muito tempo, no entanto, existe uma limitação entre conhecer o material e tornar-se possível fabricá-lo. Peierls (1935) foi um dos primeiros pesquisadores a relatar a impossibilidade de produzir materiais bidimensionais devido à instabilidade termodinâmica. Olaru (1977) conseguiu calcular a estrutura eletrônica do grafeno e discorrer sobre suas potenciais aplicações. Fradkin (1986), através de um trabalho teórico identificou algumas das propriedades do grafeno e concluiu que o “grafite 2D”, se referindo ao grafeno, só tinha finalidade para demonstração acadêmica, pois o material era demasiadamente instável.

No entanto, a capacidade da rede cristalina do grafeno em vibrar e se deformar na direção perpendicular ao plano do cristal não foi considerado pelas teorias (FASOLINO; LOS; KATSNELSON, 2007). Tanto é que, em 2004, a produção de grafeno tornou-se possível. Os físicos Andre Geim e Konstantin Novoselov conseguiram elaborar um método relativamente simples, porém eficaz para obtenção deste material, conhecido como *Scotch-tape* (NOVOSELOV *et al.*, 2005). O método utiliza uma fita adesiva para isolar uma camada superior da grafite que posteriormente é pressionada contra um substrato. Se a aderência de uma monocamada atômica de carbono (grafeno) ao substrato for mais forte do que aquela entre as camadas da grafite, o grafeno pode ser transferido para a superfície do substrato (NOVOSELOV, 2011). A Figura 2.5 mostra o procedimento adotado por eles.



Figura 2.5 - Método para obtenção do grafeno (*Scotch-tape*). Novoselov (2011).

A pesquisa com grafeno progrediu rapidamente, dentre os motivos destaca-se os procedimentos de laboratório relativamente simples e barato que permitem obter o grafeno de alta qualidade. Além disso, importantes propriedades foram encontradas por diversos pesquisadores. Particularmente, para nanofluidos, as vantagens das nanofolhas de grafeno

em comparação com outras nanopartículas foram apresentadas no trabalho de Sadeghinezhad *et al.* (2016) e citadas a seguir:

- Síntese simples e tempo de suspensão mais longa (mais estável).
- Maior proporção área de superfície / volume (1000 vezes maior).
- Elevada condutividade térmica.
- Baixa erosão, corrosão e entupimento.
- Baixa demanda por energia de bombeamento.
- Redução no estoque de fluido de transferência de calor.
- Significativa economia de energia.

2.2. Nanofluidos

A Figura 2.6 mostra que a condutividade térmica dos materiais sólidos, incluindo o grafeno, possui maior ordem de grandeza do que os fluidos que são geralmente utilizados nos sistemas de arrefecimento, como a água, o etilenoglicol e o óleo de motor.

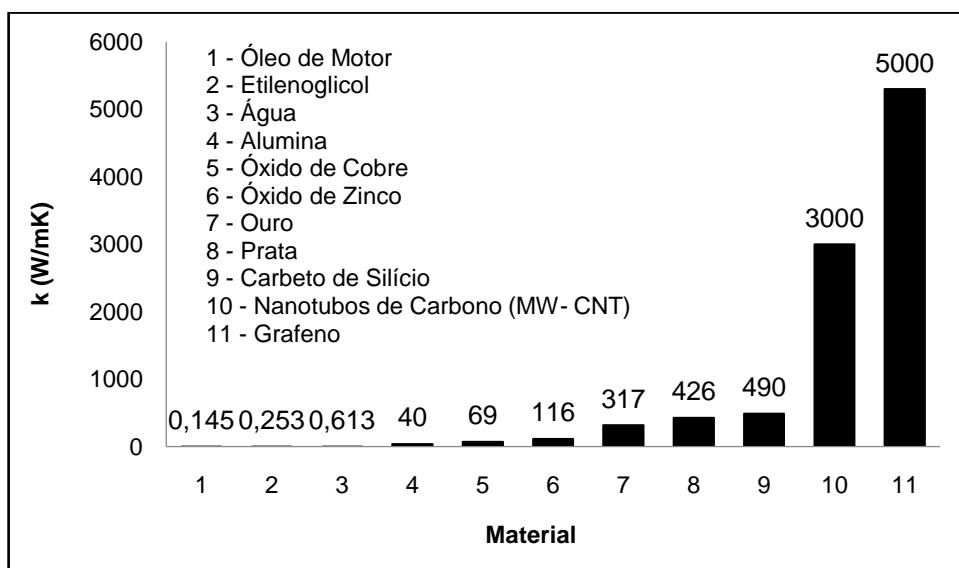


Figura 2.6 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptada de Choi (1998) e Balandin *et al.* (2008).

Este fato se tornou o ponto de partida para que Maxwell (1873) tivesse a ideia de criar suspensões utilizando partículas sólidas com o objetivo de aumentar a condutividade térmica do fluido, e consequentemente melhorar o seu desempenho durante a transferência de calor. Ele utilizou partículas de dimensões milimétricas e micrométricas. No entanto, apesar de suspensões com partículas nestas dimensões aumentar a transferência de calor, elas apresentam rápida sedimentação, o que provoca obstrução e desgaste das tubulações gerando uma elevada perda de carga (WANG; ZHOU; PENG, 2003). Assim, a rápida sedimentação provocada pelo tamanho das partículas era o ponto chave que impedia a aplicabilidade dessas suspensões. Então, a partir do advento da nanotecnologia, com a capacidade de manipular de forma controlada materiais à escala nanométrica (1nm ~ 100nm), a fabricação de nanopartículas tornou-se possível e novas iniciativas partindo do mesmo conceito proposto por Maxwell (1873) começaram a surgir.

Masuda *et al.* (1993) foram os pioneiros na utilização de nanopartículas com o objetivo de intensificar as propriedades termofísicas de um fluido. As nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de silício (SiO_2) e de dióxido de titânio (TiO_2) utilizadas por eles provocaram um incremento da condutividade térmica da suspensão proporcionalmente ao aumento da concentração das nanopartículas. Porém, Choi e Eastman (1995) foram os primeiros a utilizar o termo nanofluido para designar uma suspensão de nanopartículas metálicas dispersas em fluidos convencionais de transferência de calor. Os resultados obtidos por Choi e Eastman (1995) através de um estudo com nanofluido de cobre e água comprovaram o que Masuda *et al.* (1993) tinham observado, ou seja, o nanofluido possuía uma elevada condutividade térmica.

De acordo com Das; Putra; Roetzel (2003) com uma fração muito pequena em volume de partículas nanométricas, propriedades como a condutividade térmica e a capacidade de transferência de calor por convecção das suspensões são significativamente melhoradas sem os problemas encontrados nas suspensões comuns (suspensões com partículas de dimensões milimétricas e micrométricas), tais como entupimento, erosão, sedimentação e aumento na perda de carga.

O incremento da condutividade térmica do fluido foi uma das primeiras características investigadas por Eastman *et al.* (2001). Eles observaram um incremento de 40% na condutividade térmica do etilenoglicol para uma concentração em volume de 0,3% de nanopartículas de cobre. Observando o enorme aumento da condutividade térmica, diversas pesquisas têm sido realizadas e os resultados têm sido satisfatórios apresentando incrementos significativos para baixas concentrações de nanopartículas. Ahammed *et al.*

(2016) relatam um incremento de 28,02% para nanofluido de grafeno e água com uma concentração em volume de apenas 0,15%.

A transferência de calor por convecção em nanofluidos também foi investigada por diferentes pesquisadores, com base nisso, uma melhoria significativa foi relatada na taxa de transferência de calor. Heris; Etemad; Esfahany (2006) utilizaram nanofluidos de óxido de cobre (CuO) e óxido de alumínio (Al_2O_3) para avaliar a transferência de calor por convecção através do fluxo laminar em um tubo circular com fluxo de calor constante. Os resultados mostraram que para baixas concentrações a transferência de calor praticamente não foi modificada, porém, com o aumento da concentração um aumento significativo foi observado. Utilizando o mesmo procedimento experimental com nanofluido de grafeno e água, Zanjani *et al.* (2016) obtiveram um incremento de 14,2% para o coeficiente de transferência de calor para uma concentração em volume de 0,02%.

É importante ressaltar que a síntese e a preparação das suspensões é uma etapa importante no desempenho dos nanofluidos, uma vez que, a melhoria das suas propriedades de transporte térmico está condicionada à obtenção de uma suspensão estável, sem aglomerações e sem alterações químicas (SUNDAR; SINGH, 2013).

2.2.1. Produção de nanofluidos

Os componentes básicos do nanofluido são as partículas de dimensões nanométricas (nanopartículas) e um líquido que é comumente denominado de fluido base. Porém, com o objetivo de aumentar a estabilidade das suspensões podem-se utilizar surfactantes. Os surfactantes ou tensoativos são agentes de atividade superficial, ou seja, eles conseguem alterar as propriedades superficiais e interfaciais do líquido, de tal modo que favoreça a ligação entre as nanopartículas e o fluido base. A Figura 2.7 apresenta os componentes mais comuns utilizados por pesquisadores para produção de nanofluido.

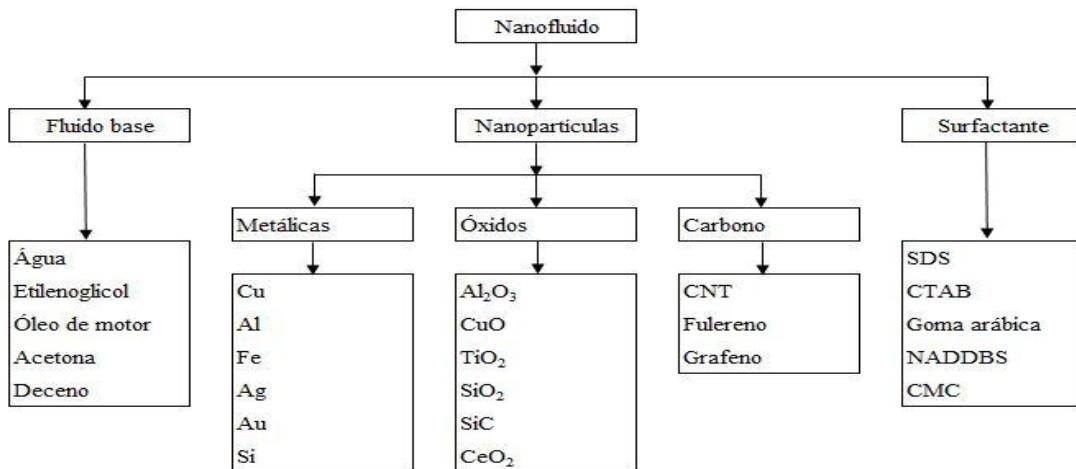


Figura 2.7 - Componentes utilizados na produção de nanofluido. Rashmi *et al.*, (2014).

Geralmente são utilizadas duas técnicas distintas para produção de nanofluidos: o método de um passo e o método de dois passos.

Método de um passo

Por este método, o nanofluido é obtido através da produção das nanopartículas de forma simultânea em que são dispersas em um fluido base, por deposição física ou química de vapor.

- **Vantagens:** Como a produção é realizada em uma única etapa, os processos de secagem, armazenamento e transporte não são necessários. Isto minimiza efeitos de oxidação e aglomeração tornando possível obter suspensões bastante estáveis.
- **Desvantagens:** Apenas pequenas quantidades de nanofluido são produzidas, isto inviabiliza a produção em escala comercial e o controle de parâmetros importantes como tamanho das partículas, concentração e quantidade do produto (CHAUPIS, 2011). Além disso, a técnica está limitada à utilização com líquidos que têm pressões de vapor suficientemente baixas para evitar a sua vaporização e consequentemente, condensar e aglomerar as partículas. Portanto, ela não funciona com fluidos de alta pressão de vapor, tais como água (CHOI; EASTMAN, 2001).

A Figura 2.8 ilustra o procedimento adotado pelo método de um passo.

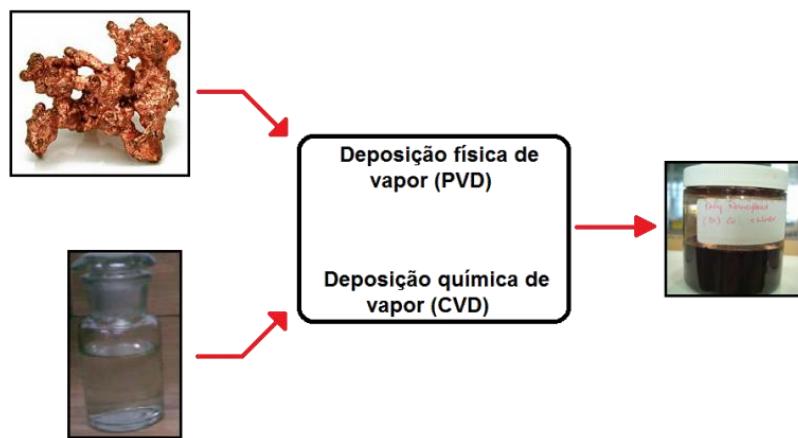


Figura 2.8 - Produção de nanofluido pelo método de um passo.

Método de dois passos

Por este método, o nanofluido é produzido em duas etapas. Na primeira etapa do processo as nanopartículas são produzidas como um pó seco ultrafino. Numa segunda fase de processamento, as partículas são dispersas no fluido base. As nanopartículas podem ser produzidas por diferentes métodos, como condensação de gás inerte, sol-gel ou deposição de vapor químico. A dispersão pode ser realizada através da agitação da mistura com o auxílio de um sonicador de alta frequência ou com homogeneizador de alta pressão (OLIVEIRA, 2012).

- **Vantagens:** Existe uma diversidade de nanopartículas disponíveis no mercado, assim, é possível obter uma grande variedade de nanofluidos. A produção industrial de nanopartículas reduz o custo de produção e torna o método de um passo mais econômico quando comparado ao de dois passos.
- **Desvantagens:** Alta probabilidade de oxidação e aglomeração das nanopartículas.

A Figura 2.9 mostra o procedimento realizado pelo método de dois passos.

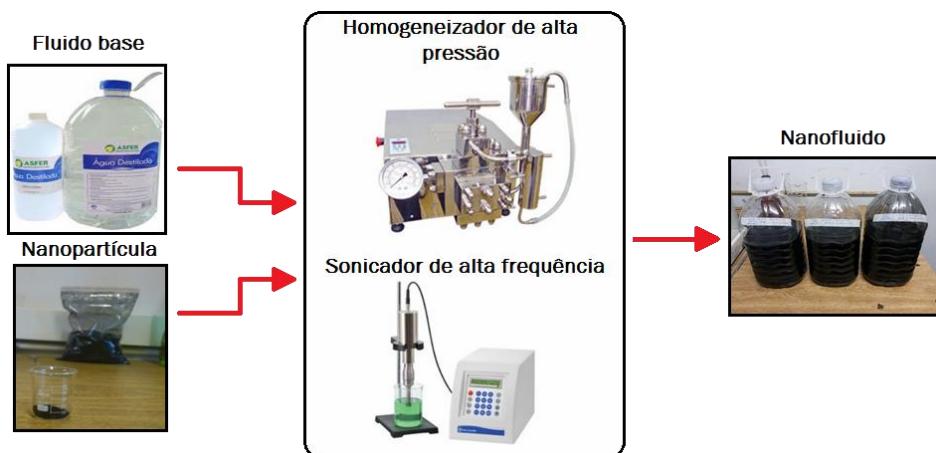


Figura 2.9 - Produção de nanolíquido pelo método de dois passos.

A obtenção de uma suspensão estável e homogênea é um grande desafio para produção de nanolíquido, pois as nanopartículas têm a tendência de se aglomerar devido às fortes interações de Van der Waals existentes entre elas (SADEGHINEZHAD *et al.*, 2016). No entanto, existem tratamentos químicos e físicos que podem ser utilizados durante o processo de produção para minimizar os efeitos de aglomeração, os principais são o emprego de surfactantes, controle de pH e tempo de dispersão.

O surfactante reduz a tensão superficial do fluido base tornando as forças intermoleculares mais fracas.

O pH pode ajudar a reduzir a aglomeração de nanopartículas, pois a estabilidade do nanolíquido está diretamente relacionada às suas propriedades eletro-cinéticas. O ajuste do pH permite que as forças de van der Waals e as eletrostáticas sejam controladas (SADEGHINEZHAD *et al.*, 2016).

Após a preparação do nanolíquido, com o decorrer do tempo as nanopartículas podem começar a aglomerar e sedimentar. A estabilidade da suspensão pode ter um período mais longo de duração dependendo do tempo de sonicação/homogeneização (MEHRALI *et al.*, 2014a).

2.2.2. Aplicação de nanolíquidos

A grande maioria dos fluidos de troca térmica são tóxicos, corrosivos, inflamáveis e apresentam alto ponto de congelamento, além de possuírem baixa condutividade térmica. Por exemplo, a água congela à 0 °C, os óleos possuem baixa condutividade térmica, os glicóis e os alcoóis são corrosivos e tóxicos, e a amônia é inflamável (MELINDER, 2008).

Tal fato despertou grande interesse de diversas áreas de pesquisa na busca por fluidos com melhor desempenho térmico, reduzido consumo de energia e com menor impacto ambiental. Os nanofluidos apresentaram-se como uma atrativa alternativa, pois suas propriedades térmica, ótica, elétrica, reológica e magnética, quando comparadas com fluidos convencionais, têm se mostrado superiores (JAVORNIK, 2013). O nanofluido também apresenta incrementos na transferência de calor e no fluxo crítico de calor e, além disso, ele pode ser produzido de tal forma que melhor se adapte às necessidades do processo. Estas vantagens permitem que o nanofluido seja utilizado em ampla gama de aplicações. Algumas delas aplicadas na engenharia são mencionadas a seguir.

O sobreaquecimento do diodo emissor de luz – LED (do inglês, *Light Emitter Diode*) tem um efeito prejudicial sobre a vida útil do *chip*. A dissipação de calor para LED de alta potência tem se tornado um grande desafio para os pesquisadores e técnicos. Os nanofluidos com notáveis propriedades térmicas têm sido avaliados para serem utilizados neste tipo de aplicação. No trabalho de Thang *et al.* (2014) foi utilizado nanofluido de nanotubos de carbono de multicamadas (MWCNTs) dispersos em uma mistura de água e etilenoglicol. Os resultados confirmaram as vantagens dos MWCNTs para sistemas de dissipação de calor para LED de alta potência e para outros dispositivos eletrônicos. A Figura 2.10 apresenta o sistema de dissipação de calor utilizando nanofluido de MWCNTs para um holofote de LED 450 W.

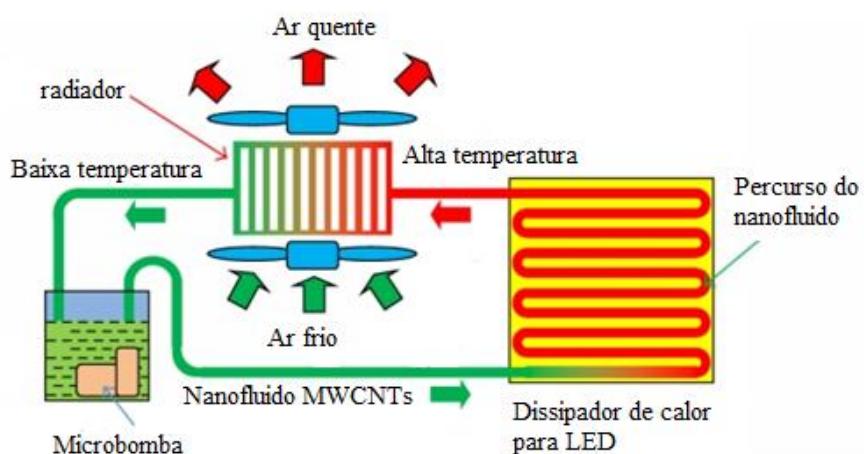


Figura 2.10 - Esquema de sistema de arrefecimento para um holofote de LED 450 W usando nanofluido MWCNTs. Thang *et al.* (2014).

A detecção de defeitos em materiais e componentes é muito importante para as indústrias garantirem a segurança das máquinas e dos componentes, a produtividade e evitarem desligamentos inesperados. A presença de um defeito ou quebra provoca uma

súbita alteração local na permeabilidade magnética, que resulta num fluxo magnético em torno da região com defeito. Para detectar os defeitos e as suas características, tais como morfologia, dimensão e localização no interior do material, é utilizado um sensor de campo magnético adequado (MAHENDRAN e PHILIP, 2013).

Deste modo, Mahendran e Philip (2013) elaboraram um sensor com nanofluido magneticamente polarizável que consistia de uma dispersão de nanopartículas à base de óxido de ferro (Fe_2O_3) com um tamanho de partículas de cerca de 10 nm, um agente tensoativo iônico de dodecil sulfato de sódio e água. O nanofluido mostrou uma mudança de cor visualmente perceptível devido às alterações no espaçamento interpartículas na presença de um fluxo magnético. Como a cor padrão do sensor é reversível, o sensor é reutilizável e permite uma rápida inspeção. A Figura 2.11 mostra o comportamento do sensor de acordo com o valor do campo magnético que é aplicado.

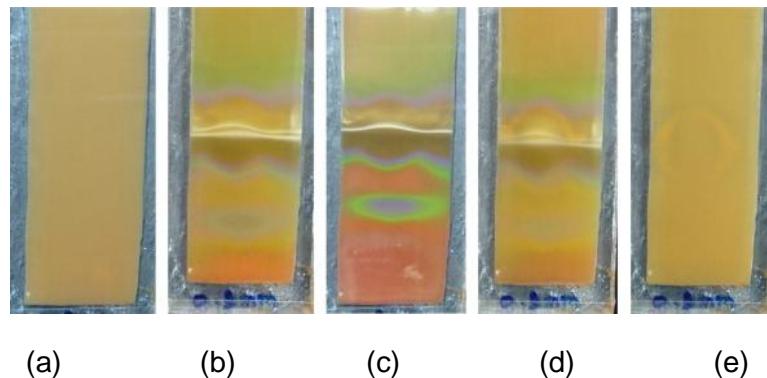


Figura 2.11 - Resposta do sensor às diferentes condições de magnetização; (a) - (c) resposta do sensor com o aumento de magnetização de zero ao valor máximo (35 mT) e (c) - (e) resposta do sensor com a diminuição do campo de magnetização do valor máximo para zero. Mahendran e Philip (2013).

O nanofluido quando comparado à água pode aumentar o fluxo crítico de calor em reatores nucleares. Isto porque as nanopartículas revestem as barras de combustível e deslocam as bolhas, de tal forma que reduz a formação de uma camada de vapor em torno da haste tornando o processo mais eficiente. No baixo fluxo de calor (Figs. 2.12a e 2.12b), ambos os fluidos estão em regime de ebulição nucleada. Quando o fluxo de calor aumenta, a água pura excede o fluxo crítico de calor e, assim, uma película de vapor estável reveste o fio (película de ebulição), o qual é de incandescência vermelha (Fig. 2.12c). No entanto, o nanofluido (Fig. 2.12d) ainda está dentro do regime de ebulição nucleada (KIM *et al.*, 2007).

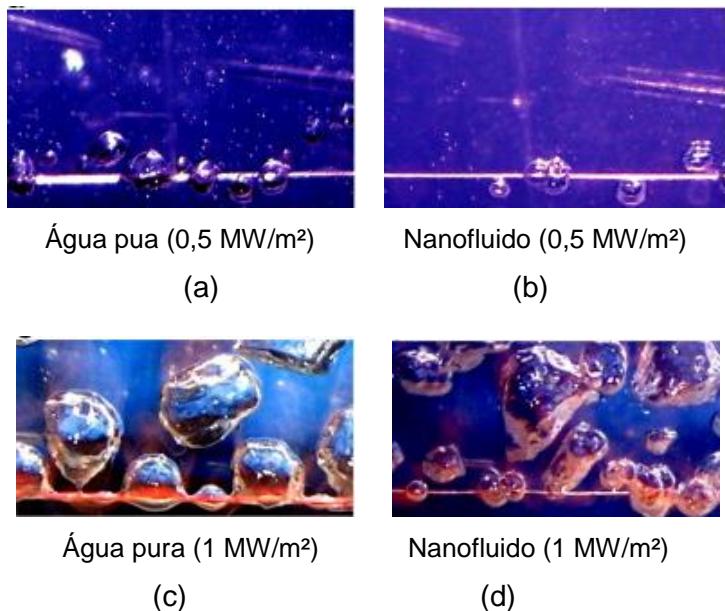


Figura 2.12 - Película de ebulação da água pura e do nanofluido de alumina para o mesmo fluxo de calor em um fio de aço inoxidável. Kim *et al.* (2007).

A maioria das tecnologias térmicas solares é construída com absorventes à base de superfície, na qual radiação solar é absorvida por uma superfície sólida (empregando revestimentos seletivos) e, em seguida, transferida para um fluido de trabalho através da transferência de calor por condução e convecção. No entanto, durante o processo, uma barreira térmica inerente está presente sob a forma de resistências à condução e convecção entre a superfície de absorção e o fluido de trabalho. Como resultado, a conversão da energia solar em energia térmica do fluido de trabalho não é um processo muito eficiente. Um dos motivos é que os fluidos de transferência de calor convencionais, como o etilenoglicol, não são bons absorventes de energia da radiação solar. Assim, é necessário a obtenção de novos fluidos que consigam melhorar a eficiência do processo. Os nanofluidos, quando empregados como fluidos de trabalho podem melhorar significativamente a absorção de energia solar, uma vez que, as nanopartículas podem ser sintetizadas com propriedades ópticas específicas para absorver a luz (KHULLAR *et al.*, 2014).

No setor de petróleo e gás o nanofluido pode potencialmente alterar os mecanismos e processos da recuperação avançada de petróleo. No trabalho de Javornik (2013) os nanofluidos constituídos de nanopartículas de carbonato de cálcio e sílica em solução com surfactante aniónico dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS) apresentaram efeito significativo para a recuperação avançada de petróleo, atingindo índices de recuperação

incremental de 2,70 e 3,72%, respectivamente. Além disso, ele pode aumentar a capacidade de escoamento do petróleo dos depósitos e promover uma remoção eficiente de detritos durante processos de perfuração devido às suas funcionalidades específicas como reologia ajustável.

Em automóveis, o nanofluido poderia substituir o óleo de motor. Sua maior condutividade térmica tornaria a troca de calor mais eficiente. Isto permitiria reduzir o tamanho dos radiadores. Além disso, menos energia seria gasta para vencer o arraste aerodinâmico e o motor poderia atingir maiores potências sem extrapolar os limites de emissão de gases (OLIVEIRA, 2012).

Todo o exposto acima é a razão pela qual o desenvolvimento de nanofluidos tem atraído grande atenção. Assim, com o objetivo de caracterizar o nanofluido para definir seu desempenho térmico-hidráulico, visando uma aplicação industrial, será apresentado a seguir o estado da arte das duas principais propriedades termofísicas (condutividade térmica e viscosidade dinâmica) em processos de transferência de calor com nanofluidos. O estudo destas propriedades é fundamental para definir a gama de aplicações porque apesar do nanofluido apresentar um incremento na condutividade térmica, a sua viscosidade também é elevada. Isto pode implicar em um problema no processo de transferência de calor, pois será necessária uma maior potência de bombeamento para manter o escoamento do fluido na mesma velocidade.

2.3. Parâmetros que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos

Condutividade térmica é a propriedade física de um material que descreve a sua capacidade de conduzir calor, portanto, é uma das propriedades termofísicas mais importantes para avaliar o desempenho térmico de um material, em particular, do nanofluido. Essa propriedade em nanofluido geralmente é maior se comparada à de um fluido convencional de refrigeração, assim, este fato tornou-se o principal motivo no desenvolvimento de pesquisas teóricas, computacionais e experimentais.

A revisão da literatura afirma que diversos fatores influenciam a condutividade térmica do nanofluido. Assim, parâmetros como morfologia, mecanismos de transferência de calor, temperatura, concentração, tipo de fluido base, surfactantes e pH serão apresentados nas seções seguintes.

2.3.1. Tamanho da nanopartícula

O tamanho da nanopartícula tem se mostrado um importante parâmetro no incremento da condutividade térmica de nanofluidos. Geralmente, os resultados obtidos para diversos tipos de nanofluidos indicam uma forte relação entre estes parâmetros, de tal forma que com a diminuição do tamanho da nanopartícula maior se torna o incremento na condutividade térmica (CHON *et al.*, 2005; KARTHIKEYAN; PHILIP; RAJ, 2008; LEE; LEE; JANG, 2014; LI; PETERSON, 2007).

2.3.2. Área superficial específica da nanopartícula

A área superficial específica é um importante parâmetro na definição da condutividade térmica do nanofluido. Se considerarmos a mesma massa de partículas, partículas menores apresentarão uma área superficial específica maior. Teoricamente se existe uma maior área de contato entre a superfície e o fluido base, a troca de calor torna-se mais fácil, por este motivo a condutividade térmica do nanofluido recebe um incremento. Isto é comprovado pelos resultados obtidos por Mehrali *et al.* (2014b). Eles elaboraram nanofluido contendo nanopartículas de grafeno com três diferentes áreas superficiais específicas de 300, 500, e 750 m²/g. Os resultados mostraram que quanto maior a área superficial específica maior se torna a condutividade térmica do nanofluido. O incremento máximo foi de 27,64% para concentração de 0,1 wt% de grafeno com uma área superficial específica de 750 m²/g.

2.3.3. Mecanismos de transferência de calor

A teoria macroscópica de transporte de calor falha para o caso de nanofluidos. Assim, diversos grupos de pesquisa têm tentado explicar o motivo do aumento da condutividade térmica observada em seus trabalhos. Mecanismos propostos para explicar o incremento da condutividade térmica em nanofluidos incluem movimento Browniano, formação da nanocamada e aglomeração das nanopartículas.

No entanto, o efeito destes mecanismos sobre a condutividade térmica ainda está em debate. A seguir, cada um deles será discutido com mais detalhes.

Movimento browniano

Durante a realização dos seus experimentos em 1827, Robert Brow, com o auxílio de um microscópio, observou que pequenas partículas (grãos de pólen) em suspensão com um líquido apresentavam movimentos irregulares, mudando sucessivamente de direção

(BROWN, 1828). Em homenagem à Robert Brow esse fenômeno passou a ser conhecido como movimento Browniano. O diagrama de Perrin representado pela Fig. 2.13 pode ser utilizado para ilustrar a trajetória aleatória de uma partícula.

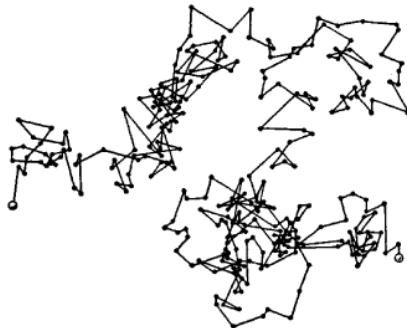


Figura 2.13 - Movimento de uma partícula num fluido. As linhas indicam as direções sucessivas e aleatórias que a partícula assume (NOTT, 2005).

Porém, a explicação do fenômeno só foi obtida em 1905, quando Einstein conseguiu demonstrar através de leis matemáticas que a movimentação aleatória das partículas era ocasionada pelas colisões entre as partículas e as moléculas do fluido (NOTT, 2005).

Beck; Sun; Teja (2007) e Nie; Marlow; Hassan (2008) relataram que o efeito do movimento Browniano pode ser desconsiderado na avaliação do incremento da condutividade térmica em nanofluidos. Beck; Sun; Teja (2007) afirmam que o movimento Browniano não é necessário para descrever o incremento na condutividade, pois os resultados demonstraram claramente que a condutividade térmica do nanofluido depende apenas do comportamento da temperatura do fluido base. De acordo com Nie; Marlow; Hassan (2008), o movimento Browniano causa um incremento na condutividade térmica de 10^{-15} W/mK, valor considerado desprezível.

Keblinski *et al.* (2002) estimou o efeito do movimento Browniano na condutividade térmica do nanofluido comparando o tempo da difusão de calor no fluido e na nanopartícula. A conclusão obtida por eles foi que o deslocamento das nanopartículas devido o movimento Browniano é muito baixa para transportar uma quantidade significante de calor através do nanofluido. No entanto, Prasher, Phelan e Bhattacharya (2006a) discordaram, pois de acordo com eles, Keblinski *et al.* (2002) não levaram em consideração o transporte de energia por convecção causado pelo movimento Browniano, e segundo os autores a convecção é tão importante quanto a difusão no movimento das nanopartículas. A conclusão de Prasher, Phelan e Bhattacharya (2006a) é similar à de Jang e Choi (2004) que

afirmaram que o movimento Browniano de partículas é induzido pela convecção, e isto implica no aumento da condutividade térmica do nanofluido. Eles concluíram ainda que o movimento Browniano das nanopartículas ao nível molecular e em nanoscala é o mecanismo-chave que regula o comportamento térmico dos nanofluidos. Assim, ainda está em intenso debate se o movimento Browniano pode ser considerado um mecanismo importante no incremento da condutividade térmica de nanofluidos (SERGIS; HARDALUPAS, 2011).

Nanocamada

De acordo com Yu *et al.* (2000) as moléculas do fluido base formam uma camada de espessura nanométrica em torno da nanopartícula, denominada por eles de nanocamada. A Figura 2.14 mostra que as moléculas do fluido que se encontram sobre a superfície da partícula ficam mais ordenadas do que as moléculas no interior do fluido.

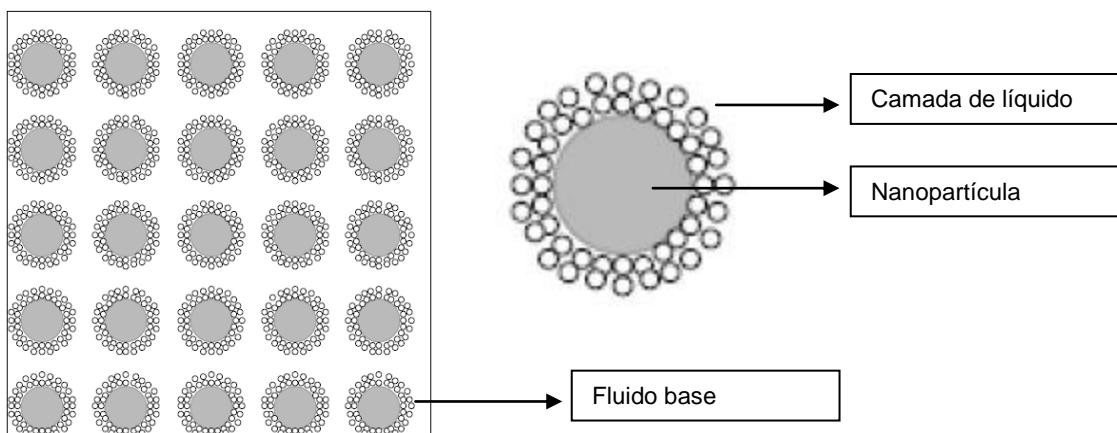


Figura 2.14 - Representação esquemática da camada nanométrica. Adaptada de Kakaç e Pramanjaroenkij (2009).

A justificativa para que a formação da nanocamada favoreça o incremento da condutividade térmica do nanofluido é que o filme formado sobre a superfície da nanopartícula possua uma condutividade térmica intermediária ($k_{np} < k_{nc} < k_{fb}$) que facilita a interação entre a nanopartícula e o fluido base. Deste modo, quanto maior sua espessura, maior se torna a intensificação da condutividade térmica do nanofluido, principalmente em partículas com diâmetro inferior à 10 nm (KEBLINSKI *et al.*, 2002).

Aglomeração de nanopartículas

A formação de aglomerações de nanopartículas é uma ocorrência comum em suspensões sólido-líquido (PRASHER; PHELAN; BHATTACHARYA, 2006b). Porém, trata-se de um dos mecanismos mais controversos para explicar as anomalias da condutividade térmica dos nanofluidos.

Teoricamente, o agrupamento de nanopartículas forma caminhos de menor resistência térmica e, consequentemente, tem um efeito importante para o incremento na condutividade térmica. Isto é possível, pois o caminho formado pelas partículas sólidas que se juntam conseguem transferir o calor de forma mais rápida que o líquido (EVANS *et al.*, 2008; PRASHER; PHELAN; BHATTACHARYA, 2006b). A Figura 2.15 ilustra de forma esquemática o comportamento deste fenômeno.

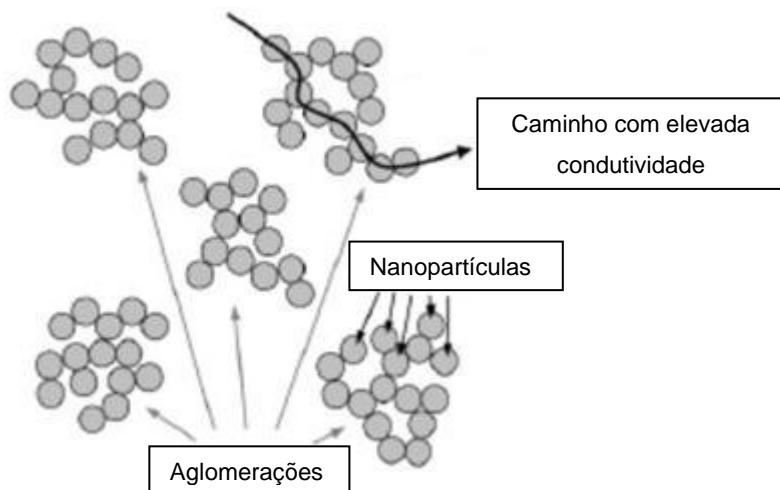


Figura 2.15 - Aglomeração de nanopartículas. Adaptada de Babu; Babu; Rambabu (2013).

Kebelinski, Prasher e Eapen (2008) utilizaram dados experimentais para avaliar potenciais mecanismos responsáveis pelo incremento na condutividade térmica de nanofluidos. A aglomeração das nanopartículas foi considerada um efeito mais significativo do que mecanismos como o movimento Browniano, nanocamada e radiação. Um resultado importante foi que a teoria do meio efetivo mostrou-se satisfatória quando o efeito de aglomeração foi considerado.

No entanto, Hong; Hong; Yang (2006) também investigaram este fenômeno utilizando nanofluidos de ferro e etilenoglicol. Os resultados mostraram que quanto menor o tamanho do aglomerado, maior tornava-se a condutividade térmica do nanofluido. De acordo com Li; Qu; Feng (2008), a redução da aglomeração diminui a viscosidade do nanofluido

melhorando o movimento Browniano das nanopartículas e consequentemente aumentando a condutividade térmica do nanofluido.

Assim, fica evidente que a aglomeração das nanopartículas possui algum efeito sobre a condutividade térmica do nanofluido, mas o comportamento ainda é desconhecido.

2.3.4. Temperatura

Geralmente é observado um aumento significativo da condutividade térmica do nanofluido com o aumento da temperatura. Esta tendência de acordo com Das *et al.* (2003) é resultado do aumento do movimento das nanopartículas no interior do fluido. Outra justificativa é que à medida que a temperatura aumenta ocorre uma redução na energia de superfície da nanopartícula o que acarreta em uma série de vantagens como a diminuição das aglomerações das nanopartículas, redução da viscosidade e aumento do movimento Browniano (LI; QU; FENG, 2008; YU; XIE; LI, 2009).

Pesquisas mais recentes mostram que esta relação entre a condutividade térmica e temperatura está praticamente estabelecida. Ahammed *et al.* (2016) avaliaram o efeito da temperatura sobre a condutividade térmica de nanofluido de grafeno e água. Os resultados apresentaram a mesma tendência observada pela maioria das pesquisas, ou seja, o aumento da temperatura provoca o aumento da condutividade térmica do nanofluido.

2.3.5. Concentração

Outro fator que possui uma forte relação com a condutividade térmica do nanofluido é a concentração de nanopartículas presentes no fluido base. Em geral, o que se tem notado é que a concentração e a condutividade térmica possuem uma relação não linear e direta, isto é, o incremento em um deles resulta no incremento não linear no outro. Este comportamento tem sido observado em diversas pesquisas como a realizada por Choi *et al.* (2001) com nanotubos de carbono à base de óleo e por Hong; Yang; Choi, (2005) com nanofluido de ferro e etilenoglicol.

Ahammed *et al.* (2016) observaram que o efeito da concentração sobre a condutividade térmica é mais importante do que a temperatura para o nanofluido de grafeno e água. O aumento médio da condutividade térmica com o aumento da concentração em volume foi cerca de 3,3% maior quando comparada ao incremento com o aumento da temperatura.

2.3.6. Condutividade térmica do fluido base

Os fluidos utilizados em aplicações de transferência de calor, tais como, água, etilenoglicol e óleo de motor são com frequência utilizados para preparação de nanofluidos. Utilizando estes fluidos Wang; Xu; Choi (1999) mostraram que o tipo de fluido base interferia na condutividade térmica do nanofluido.

Este fato foi comprovado por Behi e Mirmohammadi (2012) utilizando uma mistura de água e etanol em diferentes concentrações para elaboração de nanofluidos com nanopartículas de Al_2O_3 . Eles observaram que o etanol não seria uma boa alternativa para elaboração de nanofluido, pois à medida que aumentava a sua concentração na mistura, a condutividade térmica do fluido base diminuía e consequentemente a condutividade térmica do nanofluido também.

2.3.7. Surfactantes

Para analisar o efeito do surfactante sobre a condutividade térmica do nanofluido, Eastman *et al.* (2001) realizaram um trabalho experimental com algumas amostras contendo apenas nanofluido de óxido de cobre (CuO) e etilenoglicol e outras contendo o nanofluido e ácido tioglicólico. Eles sugeriram que o aditivo seria o responsável pelo grande incremento na condutividade térmica do nanofluido.

Arzani *et al.* (2015) analisaram o efeito do tipo de aditivo sobre a condutividade térmica de nanofluidos produzidos com nanopartículas de grafeno dispersas em água. O estudo foi realizado com dois tipos de surfactantes; o dodecil benzene sulfonato de sódio (do inglês *sodium dodecyl benzene sulfonate* – SDBS) e o ácido carboxílico. Os resultados mostraram que o tipo de aditivo modifica a condutividade térmica do nanofluido.

2.3.8. pH

Li *et al.* (2008) através de experimentos utilizando nanofluido de cobre e água demonstraram que a condutividade térmica do nanofluido varia amplamente com a variação do seu pH. Os experimentos começavam com um valor de pH igual a 3. Observava-se que a condutividade térmica aumentava gradativamente até atingir o valor máximo, cujo pH variava entre 8,5-9,5 dependendo da concentração do nanofluido, e a partir de então começava a diminuir até atingir um valor de pH igual a 12. Assim, ficou evidente que existe um pH ótimo que confere uma maior condutividade térmica ao nanofluido.

Wang *et al.* (2009) também concordaram que existe um pH ótimo responsável pelo máximo valor observado para a condutividade térmica do nanofluido. No trabalho

desenvolvido por eles o pH ótimo apresentado para o nanofluido de óxido de alumínio ficou em torno de 8 e para o óxido de cobre em cerca de 9,5, ambos dispersos em água.

Este comportamento pode ser explicado por Sadeghinezhad *et al.*, (2016). De acordo com eles a estabilidade do nanofluido está diretamente relacionada às suas propriedades eletro-cinéticas. Isso implica que o controle de pH pode interferir na condutividade térmica do nanofluido, pois se no ponto isoelétrico as forças repulsivas são reduzidas a zero, o que favorece a formação de aglomerados, para outros valores de pH a suspensão se torna mais estável pois as forças de repulsão entre as nanopartículas aumentam. Assim, com o aumento das forças de repulsão, as nanopartículas se movimentam com mais facilidade e aumenta a capacidade de transporte térmico.

2.4. Parâmetros que influenciam a viscosidade dinâmica dos nanofluidos

Para utilizar o nanofluido como um fluido de trabalho é necessário determinar suas propriedades termofísicas. Dentre as propriedades do nanofluido, a viscosidade é muito importante, uma vez que indica a sua resistência ao escoamento. Os nanofluidos apresentam uma viscosidade mais elevada do que os fluidos de trabalho comum. Com o aumento da viscosidade, a perda de carga aumenta e, portanto, uma maior potência é necessária para bombeá-lo. Muitos parâmetros afetam a viscosidade do nanofluido, incluindo o método de preparação, tipo de fluido base, temperatura, morfologia da nanopartícula, concentração de nanopartículas, acidez (valor de pH), agentes tensoativos e agregação das nanopartículas (BASHIRNEZHAD *et al.*, 2016).

2.4.1. Tamanho e forma da nanopartícula

A viscosidade do nanofluido geralmente varia de acordo com o tamanho da nanopartícula. Nguyen *et al.* (2007) estudaram o efeito do tamanho da partícula sobre a viscosidade de alumina em água. De acordo com os resultados deles, para concentrações em volume inferiores a 4%, a viscosidade do nanofluido, para nanopartículas de 36 e 47 nm, praticamente não sofreu alteração. Porém, para concentração acima de 4%, as nanopartículas de 47nm apresentaram maior viscosidade. No entanto, existem algumas contradições para esta tendência.

Namburu *et al.* (2007a) relataram que a viscosidade reduzia com o aumento da dimensão das nanopartículas de SiO_2 . Agarwal *et al.* (2013) através de um estudo com nanofluido de alumina e água 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.

A viscosidade tem forte dependência com a forma das partículas (FERROUILLAT *et al.*, 2011). Timofeeva; Routbort; Singh (2009) relataram que as partículas alongadas aumentam a viscosidade dos nanofluidos em comparação com nanopartículas esféricas.

2.4.2. Concentração

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 *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 baixíssimas concentrações.

No entanto, alguns autores relataram que o aumento da concentração não interfere na viscosidade do nanofluido (MISHRA *et al.*, 2014).

2.4.3. Temperatura

A comunidade científica de estudo com nanofluidos indica a temperatura como parâmetro mais crítico e influente sobre a viscosidade de nanofluidos. O incremento da temperatura enfraquece as interações intermoleculares entre as nanopartículas e o fluido base, motivo pelo qual os resultados apresentam uma tendência decrescente da viscosidade com o aumento da temperatura (THOMAS; SOBAN, 2011).

2.4.4. Efeito do pH

Muitos trabalhos relatam que existe um valor ótimo de pH em que os nanofluidos apresentam a menor viscosidade (WANG; LI, 2009).

No trabalho desenvolvido por Zhao *et al.* (2009), a viscosidade do nanofluido de SiO_2 em água apresentou flutuações entre valores de pH de 5 a 7. Os autores acreditam que a dimensão complexa dos agregados e da dupla camada elétrica de partículas neste intervalo de pH são as principais razões por trás das flutuações. Para valores de $\text{pH} < 5$ a viscosidade diminuiu e permaneceu praticamente constante.

2.4.5. *Tempo de dispersão*

Existem poucos estudos que abordam a influência do tempo de dispersão das nanopartículas no fluido base sobre a viscosidade do nanofluido. Em um estudo mais recente, Sadri et al. (2014) avaliou diferentes tempos de ultrasonicação (2, 7, 10, 20, 30 e 40 minutos) sobre a viscosidade de nanofluido de nanotubos de carbono em água. Eles observaram que a viscosidade aumentou entre 2 e 7 minutos. Após 7 minutos, no qual a viscosidade atingiu o valor máximo, a viscosidade começou a diminuir nitidamente com o aumento da razão da condutividade térmica e do tempo de dispersão. Os resultados mostraram que a menor viscosidade e a maior razão da condutividade térmica foram encontrados para o maior tempo de ultrasonicação (40 minutos). Esta descoberta é muito útil para preparação de nanofluidos com o objetivo de utilizá-los em processos de transferência de calor, onde a alta condutividade e baixa viscosidade são parâmetros extremamente necessários.

2.5. **Técnicas de medição**

2.5.1. *Condutividade térmica*

Diferentes técnicas têm sido utilizadas para medição da condutividade térmica de líquidos. Estas técnicas têm sido adaptadas para nanofluidos. Paul et al. (2010) apresentou um artigo sobre os diferentes métodos de medição da condutividade térmica de nanofluidos comumente utilizados. Como mostra a Fig. 2.16, o método transiente do fio quente, ou simplesmente, THW (do inglês *Transient Hot-Wire*) tem sido o mais utilizado devido à sua precisão, simplicidade de operação e rapidez na obtenção dos dados.

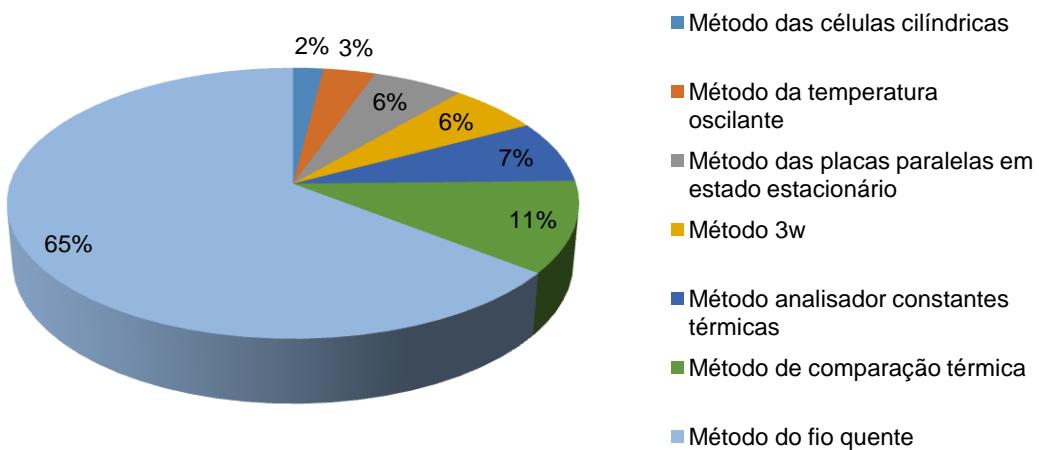


Figura 2.16 - Participação em pesquisas de diferentes métodos encontrados na literatura para medição da condutividade térmica de nanofluidos. Paul *et al.*, (2010).

A diversidade de métodos existentes para medição da condutividade térmica é justificada, pois dados precisos e confiáveis são fundamentais para os cálculos de engenharia, porém, uma grande quantidade de trabalhos utilizando diferentes técnicas tem apresentado controvérsias entre seus resultados.

No entanto, o trabalho de Buongiorno *et al.*, (2009) mostrou que o método de medição não interfere no resultado. O trabalho avaliou a condutividade térmica de amostras idênticas de nanofluidos. As medições foram realizadas por mais de 30 instituições diferentes em todo o mundo através de uma variedade de abordagens experimentais, incluindo o método do fio quente, método das placas paralelas em estado estacionário e métodos ópticos. A análise dos dados revelaram que os resultados da maioria das instituições situaram-se dentro de um intervalo de $\pm 10\%$ sobre a média da amostra, com apenas alguns valores discrepantes. As pequenas diferenças sistemáticas nos valores absolutos da condutividade térmica dos nanofluidos entre as várias abordagens experimentais desapareceram quando os dados foram normalizados com a condutividade térmica do fluido base.

Assim, as contradições entre os resultados obtidos por técnicas diferentes podem ser resultado não do método de medição, mas da própria característica do nanofluido, já que por não haver uma padronização entre os nanofluidos existe uma diversidade de variações na sua composição que conferem propriedades totalmente diferentes.

2.5.2. Viscosidade

Para avaliar a viscosidade do nanofluido um viscosímetro adequado deve ser selecionado. Os viscosímetros medem grandezas físicas, tais como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão, tempo, etc., que são transformadas em unidades de tensão e de taxa de cisalhamento. Então, através de equações deduzidas a partir dos princípios e leis da mecânica clássica determina-se a viscosidade. No mercado há uma grande variedade de viscosímetros que podem se adaptar às nossas necessidades. Existem três tipos principais: o capilar, o de corpo móvel e o rotacional.

Os viscosímetros capilares determinam a viscosidade de fluidos newtonianos através da medida da velocidade de escoamento do fluido em um tubo capilar sob a ação de uma diferença de pressão constante. O tempo do escoamento é determinado entre duas marcas existentes no equipamento.

Os viscosímetros de corpo móvel permitem determinar a viscosidade de fluidos newtonianos através da medida do tempo da queda de um corpo no interior do fluido. A geometria do corpo geralmente é uma esfera (viscosímetro Hoppler), no entanto, corpos cilíndricos e agulha também podem ser utilizados. A contagem do tempo começa quando o corpo atinge a velocidade terminal que é alcançada quando a força peso se iguala à soma da força de empuxo e da força de arrasto.

Os viscosímetros rotacionais podem determinar a viscosidade de fluidos newtonianos através da medição do torque e da velocidade angular de uma parte móvel que se separa de uma parte fixa pelo fluido. Existem várias versões de viscosímetros rotativos, os mais comuns em relação à geometria são do tipo com cilindros coaxiais, placas paralelas e de cone-placa.

Geralmente, os nanofluidos têm apresentado um comportamento de fluido newtoniano. Das; Putra; Roetzel (2003) relataram o comportamento newtoniano do nanofluido de alumina em água para concentração em volume de nanopartículas de 1 e 4%. Namburu *et al.* (2007b) obteve o mesmo comportamento para nanofluidos de óxido de cobre em uma mistura de água em etilenoglicol para concentrações em volume de 1 à 6,12%. No entanto, Abareshi *et al.* (2011) relata que o nanofluido de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) em glicerol apresentou um comportamento pseudoplástico.

2.6. Correlações para estimar as propriedades termofísicas

O dimensionamento dos equipamentos, principalmente os que envolvem transferência de calor, exige dados precisos das propriedades térmicas e físicas do fluido de arrefecimento, tais como condutividade térmica, viscosidade, calor específico e massa específica. Com a possibilidade de utilizar nanofluido como fluido de trabalho em sistemas de troca de calor é desejável que as suas propriedades termofísicas sejam previstas por correlações, uma vez que, a determinação experimental é mais onerosa. No entanto, os resultados de diversos trabalhos experimentais têm apresentado inconsistências quando comparados aos modelos teóricos, isto impede de estabelecer as correlações como confiáveis na determinação das propriedades. O principal motivo das disparidades é a influência de uma série de fatores sobre as propriedades do nanofluido que muitas vezes não são consideradas pelas correlações.

Assim, como a consolidação dos modelos teóricos para prever os fenômenos de transferência de calor em nanofluidos ainda não aconteceu, é necessário que novos estudos sejam realizados. Neste sentido algumas correlações serão abordadas a seguir.

Geralmente, as correlações são dadas em função da concentração volumétrica (ϕ) calculada pela Eq. (2.1), que representa a relação entre o volume de nanopartículas (V_{np}) dispersas em um determinado volume de fluido base (V_{fb}).

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

2.6.1. Massa específica

Baseada na regra da mistura e inicialmente desenvolvida para o cálculo da massa específica de duas fases entre partículas sólidas de tamanho micrométrico em líquidos, a Eq. (2.2) foi adaptada por Pak e Cho (1998) considerando partículas de tamanho nanométrico para o cálculo da massa específica de nanofluidos.

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

onde a massa específica da nanopartícula (ρ_{np}) é fornecida pelo fabricante, e a massa específica do fluido base (ρ_{fb}) pode ser encontrada em livros e programas computacionais.

A equação proposta por Pak e Cho (1998) é utilizada pela maioria dos trabalhos. A Tabela 2.1 mostra uma análise qualitativa que varia de muito bom (ótimo), satisfatório (razoável) à ruim (subestimado/superestimado) que alguns autores obtiveram utilizando a equação em comparação com os respectivos resultados experimentais.

Tabela 2.1 - Desempenho do modelo teórico utilizado para o cálculo da massa específica de nanofluidos.

Autores	Nanofluido	Resultado
Pak e Cho (1998)	TiO ₂ -H ₂ O e γ-Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Ótimo
Vajjha e Das (2008)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O/EG	Ótimo
Ho <i>et al.</i> (2010)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Ótimo
Pakdaman, Behabadi e Razi (2012)	MWCNT-óleo	Razoável
Kumaresan e Velraj (2012)	MWCNT-H ₂ O/EG	Superestimado
Heyhat <i>et al.</i> (2012)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Ótimo
Saeedinia, Behadi e Razi (2012)	CuO-óleo	Ótimo
Ali, Zeitoun e Almotairi (2013)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Ótimo
Mahbubul <i>et al.</i> (2013)	Al ₂ O ₃ - R141b	Subestimado
Haddad et al.(2014)	NiPd-heptano	Ótimo
Sudarmadji et al.(2014)	Al ₂ O ₃ -H ₂ O	Ótimo
Ijam <i>et al.</i> (2015)	Óxido de grafeno-H ₂ O/EG (60:40% vol.)	Superestimado

2.6.2. Calor específico

Proposta por Pak e Cho (1998) considerando o equilíbrio térmico entre as duas fases de uma mistura homogênea, a Eq. (2.3) foi o primeiro modelo utilizado para o cálculo do calor específico de nanofluidos

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

Na qual (ϕ) é a concentração volumétrica e (c_p) representa o calor específico do nanofluido (nf), do fluido base (fb) e da nanopartícula (np).

No entanto, devido às considerações adotadas por Pak e Cho (1998), a equação proposta por eles não é válida para dispersões que apresentam grande diferença entre a massa específica da nanopartícula e do fluido base. Para o nanofluido de óxido de alumínio (Al_2O_3) e água, por exemplo, o desvio não pode ser ignorado, pois a diferença entre a massa específica das nanopartículas e do fluido base é grande; para o Al_2O_3 ($\rho_{np} = 3600 \text{ kg/m}^3$), enquanto para a água ($\rho_{fb} = 994,7 \text{ kg/m}^3$), de tal maneira que maior se torna a discrepância quanto maior for a concentração em volume de nanopartículas (ZHOU *et al.*, 2010).

Então, Xuan e Roetzel (2000) realizaram uma modificação do modelo de Pak e Cho (1998), o segundo modelo dado pela Eq. (2.4) considera a diferença existente entre a massa específica da nanopartícula (ρ_{np}) e do fluido base (ρ_{fb}).

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi) \rho_{fb} c_{p,fb} + \phi \rho_{np} c_{p,np}}{(1 - \phi) \rho_{fb} + \phi \rho_{np}} \quad (2.4)$$

Onde (ϕ) é a concentração volumétrica e (c_p) representa o calor específico do nanofluido (nf), do fluido base (fb) e da nanopartícula (np).

Khanafer e Vafai (2011) e O'Hanley *et al.* (2012) mostraram que o segundo modelo tem melhor concordância com os dados experimentais quando comparado com o primeiro. A revisão da literatura mostra que ele foi o mais utilizado para estimar o calor específico de nanofluidos e os resultados foram satisfatórios, como os obtidos por Zhou *et al.* (2010) que utilizaram nanofluidos de óxido de cobre (CuO) com etilenoglicol e água, e dióxido de silício (SiO_2) em água.

2.6.3. Condutividade térmica

Os primeiros modelos desenvolvidos para determinação da condutividade térmica de suspensões de partículas sólidas em líquidos, conhecidos como modelos clássicos, consideram que as partículas ficam estáticas no interior do fluido.

O primeiro modelo clássico foi proposto por Maxwell (1873). No desenvolvimento da correlação, baseando-se na teoria do meio efetivo, Maxwell considerou uma mistura homogênea cujas partículas eram esféricas, com tamanho de dimensões milimétricas e micrométricas e que não corria interação entre elas (KUMAR, KUMAR e SENDHILNATHAN, 2010). A correlação obtida por Maxwell é apresentada pela Eq. (2.5) com a nomenclatura adaptada para o estudo com nanofluido.

$$k_{nf} = k_{fb} \left[\frac{k_{np} + 2k_{fb} + 2\phi(k_{np} - k_{fb})}{k_{np} + 2k_{fb} - \phi(k_{np} - k_{fb})} \right] \quad (2.5)$$

Onde (k_{nf}) é a condutividade térmica do nanofluido, (k_{fb}) é a condutividade do fluido base, (k_{pf}) é a condutividade térmica da nanopartícula e (ϕ) é a concentração volumétrica.

O modelo de Maxwell foi modificado por Hamilton e Crosser (1962) por considerarem que a forma das partículas possuía um efeito substancial sobre a condutividade térmica da suspensão. A Equação (2.6) considera a geometria das partículas através do fator de forma.

$$k_{nf} = k_{fb} \left(\frac{k_{np} + (n-1)k_{fb} - \phi(n-1)(k_{fb} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{fb} + \phi(k_{fb} - k_{np})} \right) \quad (2.6)$$

Sendo (k_{nf}), (k_{np}), (k_{fb}) a condutividade térmica do nanofluido, da nanopartícula, e do fluido base, respectivamente. (ϕ) é a concentração volumétrica, ($n = 3/\Psi$) é o fator de forma, e (Ψ) é a esfericidade da nanopartícula. Para partículas esféricas $\Psi = 1$, e para partículas cilíndricas $\Psi = 0,5$. Pode-se observar que para partículas esféricas o modelo de Hamilton e Crosser se torna igual ao de Maxwell.

Trabalhos recentes, como o de Zanjani *et al.* (2016) obtiveram bons resultados para estimar a condutividade térmica do nanofluido de grafeno e água utilizando apenas os modelos clássicos que foram mencionados.

Em contraste, modelos dinâmicos assumem o efeito do movimento aleatório das nanopartículas e da incorporação de outros parâmetros que não são considerados pelos modelos clássicos.

Alguns autores afirmam que os modelos clássicos não conseguem prever a condutividade térmica de nanofluidos, pois diferentes dos modelos dinâmicos, eles não incluem o efeito da temperatura, do tamanho das partículas, da camada interfacial, da aglomeração e do movimento Browniano, mas apenas a forma e a fração volumétrica das partículas e a condutividade térmica das partículas e do fluido base (KLEINSTREUER e FENG, 2011; KUMAR, KUMAR e SENDHILNATHAN, 2010). No entanto, de acordo com Chandrasekar *et al.* (2009) a cada 30% de aumento da condutividade térmica do nanofluido, 21% está relacionado à forma das nanopartículas, 6% é referente à espessura da nanocamada e 3% devido ao movimento Browniano das nanopartículas. A forma da nanopartícula também é apontada por Gao e Zhou (2006) como a principal responsável pelo elevado incremento da condutividade térmica do nanofluido.

Assim, a fim de analisar os possíveis efeitos da temperatura, da nanocamada e do movimento Browniano muitos modelos foram propostos. No entanto, a difícil determinação de algumas variáveis, como a espessura e a condutividade térmica da nanocamada, os tornaram pouco usuais.

A revisão da literatura não informa, até o momento, uma correlação geral que consiga prever a condutividade térmica de nanofluidos. Existem correlações para nanofluidos específicos, geralmente, limitadas à uma faixa de temperatura e concentração. No entanto, isto não é resultado apenas das falhas dos modelos, mas também das grandes disparidades encontradas pelos resultados experimentais.

2.6.4. Viscosidade

Muitos modelos foram desenvolvidos para estimar a viscosidade de suspensões contendo partículas sólidas, que posteriormente também foram adotados para nanofluidos. Os mais utilizados foram obtidos a partir do modelo de Einstein (1911). Ele elaborou o modelo assumindo que as partículas fossem esferas rígidas e que não havia interação entre elas. Então, partindo do cálculo hidrodinâmico de um fluido incompressível por meio das equações de Navier-Stokes ele obteve a Eq. (2.7), dada em função da viscosidade do fluido base (μ_{fb}) e da concentração volumétrica das nanopartículas (ϕ).

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_{fb} \quad (2.7)$$

O modelo de Brinkman (1952) apesar de considerar a interação entre as partículas assume que não ocorre a formação de aglomerados. Assim, como o modelo de Einstein, ele é indicado para baixas concentrações. Nestes casos, a viscosidade do nanofluido pode ser obtida pela Eq. (2.8).

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{(1-\phi)^{2,5}} \quad (2.8)$$

O modelo de Batchelor (1977) pode ser utilizado quando $\phi \geq 0,01$, pois a partir desta concentração as interações hidrodinâmicas entre as partículas tornam-se importantes (CHEN, DING e TAN, 2007). A Equação (2.9) que representa o modelo de Batchelor foi elaborada considerando o movimento Browniano das partículas.

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2)\mu_{fb} \quad (2.9)$$

As altas concentrações ($\phi > 0,1$) não são típicas para os nanofluidos. No entanto, para estes casos, o modelo de Wang; Xu; Choi (1999) representado pela Eq. (2.10) pode ser indicado (GHOZATLOO *et al.*, 2015).

$$\mu_{nf} = (1 + 7,3\phi + 123\phi^2)\mu_{fb} \quad (2.10)$$

Alguns trabalhos como o de Zanjani *et al.* (2016) ao utilizar os modelos de Einstein, Brinkman e Batchelor conseguiram boa concordância com os dados experimentais para o nanofluido de grafeno em água. No entanto, a revisão da literatura mostra que ainda não existe uma equação geral para a viscosidade dinâmica de nanofluidos, pois em muitos trabalhos a maioria dos modelos não concorda com os dados experimentais. A justificativa mais provável é que eles não consideram parâmetros importantes, como por exemplo, a morfologia das nanopartículas.

Assim, uma modificação nestes modelos foi realizada por Ghozatloo *et al.* (2015) na tentativa de aumentar a precisão dos resultados. A modificação proposta por eles é representada pela Eq. (2.11), e considera as diferentes geometrias das nanopartículas.

$$\xi = \phi \left(1 - \frac{D}{L} \right) \quad (2.11)$$

Onde (D/L) é o fator de forma com valor específico para nanopartículas com diferentes geometrias conforme apresenta a Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Fator de forma proposta para diferentes nanopartículas.

Dimensão	Geometria	D/L
0D	Esférica	0,21
1D	Cilíndrica	0,11
2D	Plana	0,01

Finalmente, os modelos modificados são apresentados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Modificação dos modelos teóricos para determinação da viscosidade de nanofluidos.

Modelo	Equação Modificada	Equação n°
Einstein (1911)	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\xi)\mu_{fb}$	(2.12)
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{(1 - \xi)^{2,5}}$	(2.13)
Batchelor (1977)	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\xi + 6,2\xi^2)\mu_{fb}$	(2.14)
Wang, Xu e Choi (1999)	$\mu_{nf} = (1 + 7,3\xi + 123\xi^2)\mu_{fb}$	(2.15)

Os modelos modificados apresentaram uma relativa melhoria. O valor máximo do desvio em relação aos dados experimentais foi cerca de 9,69% para o modelo modificando de Wang, Xu e Choi (1999) para o nanofluido de grafeno em etilenoglicol com concentração em volume de 1,5%.

2.7. Transferência de calor por convecção e perda de carga

No escoamento interno, os efeitos viscosos causam perdas energéticas significativas e são responsáveis por grande parte da energia necessária para o transporte de fluidos. O transporte de energia é uma parte integrante de uma ampla gama de campos industriais, incluindo petróleo e gás, energia nuclear e energia elétrica. Nos sistemas de energia, a água, o óleo e o etilenoglicol são utilizados com frequência como fluidos de troca de calor. Assim, o desenvolvimento de fluidos de transferência de calor com condutividade térmica mais elevada tornou-se cada vez mais necessário para o desempenho destes sistemas (SADEGHINEZHAD *et al.*, 2014).

O nanofluido tem apontado como uma possível alternativa aos fluidos comuns de arrefecimento. O incremento das propriedades termofísicas, principalmente da condutividade térmica, além da estabilidade e do aumento da transferência de calor com pequena perda de carga tem sido o motivo do interesse das pesquisas.

A investigação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada para nanofluidos foi realizada por diversos estudos. Uma diversidade de nanofluidos constituídos de diferentes fluidos base e nanopartículas, principalmente metais e óxidos, e mais recentemente alótropos do carbono, como grafeno, nanotubos de carbono e o grafite foram utilizados. Para não fugir do escopo deste trabalho, devido à diversidade de nanofluidos, a atenção será dada para as pesquisas experimentais com nanofluidos de grafeno que avaliaram o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada.

Nas pesquisas desenvolvidas por Baby e Sundara (2011a) e Baby e Sundara (2011b), a causa provável citada pelos autores para a diminuição na transferência de calor entre a entrada e a saída da tubulação é devido à perda de carga, pois segundo eles, o atrito consumia parte da energia das nanopartículas e diminuía a capacidade delas de transferirem calor para a superfície do tubo.

No entanto, muitas pesquisas como a de Yang *et al.* (2011) e a de Zanjani *et al.* (2013) têm relatado que o incremento da concentração de nanopartículas pode aumentar o potencial de transferência de calor do nanofluido sem provocar uma penalidade extra na

potência de bombeamento. Para Zubir *et al.* (2015) os baixos incrementos para o fator de atrito e para a perda de carga em relação ao fluido base indicam 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.* (2014) 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. Além disso, o coeficiente de transferência de calor aumentou à medida que o fluxo de calor sofria um incremento. A perda de carga variou entre 0,4% a 14,6% para Reynolds variando entre 5000 e 22000. No entanto, a análise do fator de desempenho térmico mostrou que nanofluido de grafeno pode funcionar bem como fluido de trabalho em aplicações de transferência de calor e ser uma boa alternativa para fluidos convencionais.

A mesma conclusão foi obtida por Mehrali *et al.* (2015a), porém sob uma perspectiva diferente. Eles avaliaram o efeito da área superficial específica de nanopartículas de grafeno em várias concentrações sobre a transferência de calor em condições de fluxo turbulento e convecção forçada dentro de um tubo circular submetido à um fluxo de calor constante na parede. O coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido foi maior do que para a água destilada em cerca de 83 a 200%. Eles observaram que o coeficiente de transferência de calor aumentava com o aumento da área superficial específica. No entanto, a perda de carga e o fator de atrito aumentaram simultaneamente na faixa de 0,06% ($300\text{m}^2/\text{g}$) -14,7% ($750\text{ m}^2/\text{g}$). Apesar disso, o fator de desempenho térmico foi de 1,51; 1,74 e 1,89 para área superficial específica de 300, 500, e $750\text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente.

Ainda utilizando o trabalho de Mehrali *et al.* (2015a) é possível realizar uma análise da influência do regime de escoamento sobre o coeficiente de transferência de calor e sobre a perda de carga, pois, Mehrali *et al.* (2015b) também utilizou o nanofluido de grafeno com área superficial específica de $750\text{ m}^2/\text{g}$. A análise foi realizada de forma semelhante à de Mehrali *et al.* (2015a), ou seja, considerando a variação da concentração em massa de 0,025 à 0,1% sob fluxo de calor constante e convecção forçada, no entanto em regime laminar. O incremento máximo obtido por eles para concentração de 0,1 wt% foi de 15% para o coeficiente de transferência de calor e 1,15 para o fator de desempenho térmico, cujos valores foram muito inferiores ao encontrado em regime turbulento com a mesma área específica e concentração.

A Tabela 2.4 resume os resultados experimentais obtidos por autores com estudos experimentais sobre transferência de calor por convecção forçada com nanofluidos.

Tabela 2.4 - Trabalhos experimentais sobre transferência de calor por convecção forçada com nanofluidos de grafeno.

Autores	Geometria	Nanofluido	Conclusão
Baby e Sundara (2011b)	Tubo de aço inoxidável (L = 108 cm; d = 23 mm)	Nanopartícula: prata coberta com grafeno funcionalizado com hidrogênio (Ag-HEG) - Fluido base: água Nanopartícula: prata coberto com grafeno funcionalizado com hidrogênio (Ag-HEG) - Fluido base: etilenoglicol	Regime: turbulento (Re = 15500) Incremento (h): 105% - $\phi = 0,005\%$; 122% - $\phi = 0,01\%$ Regime: laminar (Re = 250) Incremento (h): 188% - $\phi = 0,005\%$; 289% - $\phi = 0,01\%$
Yang et al. (2011)	Tubo de cobre (L = 2,68 m; d = 1,34 cm)	Nanopartícula: diamante-grafeno (ND-50) - Fluido base: água	Regime: laminar (Re = 290 - 1550) Incremento (Nu) : 3 - 6%
Zanjani et al. (2013)	Tubo de cobre (L = 2,74 m ; d = 4,20mm)	Nanopartícula: grafeno Fluido base: água	Regime: turbulento (Re = 10850) Incremento (h) : 6,04% Incremento (ΔP): 0,8%
Sadeghinezhad et al. (2014)	Tubo de aço inoxidável (L = 1,40 m; d = 10 mm)	Nanopartícula: grafeno Fluido base: água	Regime: Turbulento (Re = 5000 - 22000) $q'' = 12320 \text{ W/m}^2 \text{ e } \text{wt} = 0,1\%$ Incremento (h): 131 - 160% Incremento (ΔP): 0,4 - 14,6% $q'' = 8231, 10351 \text{ e } 12320 \text{ W/m}^2 ; \text{wt}=0,1\% \text{ e } \text{Re}=22000$ Incremento (h): 131, 146 e 160%.
Zubir et al. (2015)	Tubo de aço inoxidável (L = 1,40 m; d = 10 mm)	Nanopartícula: óxido de grafeno Fluido base: água	Regime: turbulento (Re = 14065) Incremento (Nu) : 144%
Mehrali et al. (2015a)	Tubo de aço inoxidável (L = 1,40 m; d = 10 mm)	Nanopartícula: grafeno com diferentes áreas superficiais específicas Fluido base: água	Regime: Turbulento (Re = 22000) $\text{wt}=0,1\% \text{ e } \text{ASE: } 300 - 500 - 750 \text{ m}^2/\text{g}$ Incremento (h): 83 - 160 - 200% $\text{ASE} = 750 \text{ m}^2/\text{g}$ Incremento (h): 31% - wt = 0,025%; 63% - wt = 0,05%; 130% - wt = 0,075%; 200% - wt = 0,1% Incremento (ΔP): 10% - wt = 0,025% ; 10,6% - wt = 0,05% ; 13,2% - wt = 0,075% ; 14,7% - wt = 0,1%
Mehrali et al. (2015b)	Tubo de aço inoxidável (L = 2,0 m; d = 4,5 mm)	Nanopartícula: grafeno com área superficial específica de 750 m ² /g Fluido base: água	Regime: laminar (Re = 2300) Incremento máximo(h) : 15% - wt = 0,1%

Em resumo, observa-se que o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga aumentam com o aumento da concentração de nanopartículas. Outros parâmetros como a área superficial específica, o regime de escoamento e o fluxo de calor mostraram ser importantes para o desempenho termo-hidráulico do nanofluido de grafeno.

2.8. Regime de transição laminar-turbulento

Durante o escoamento de fluidos em tubos, o critério mais adotado pela literatura informa que se o número de Reynolds for menor que 2300 o escoamento é dito laminar e quando o número de Reynolds for superior à 10000 é denominado turbulento, enquanto que no intervalo entre 2300 e 10000 tem-se uma faixa chamada de transição laminar-turbulento. Em função da complexidade do comportamento hidrodinâmico e térmico no regime de transição, a recomendação usual é evitá-lo, assim como a operação nessa região; no entanto, isso nem sempre é viável sobre as restrições do projeto. Por exemplo, um importante problema de projetos de trocadores de calor industriais surge quando o escoamento no interior do tubo se encontra na região de transição (ÇENGEL, 2009).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O estudo experimental para a determinação do coeficiente de transferência de calor e da perda de carga com nanofluidos é realizado basicamente em quatro etapas. A primeira etapa trata-se do método de produção. A segunda etapa é necessária para verificar se as concentrações previamente definidas na etapa de produção foram satisfeitas. A terceira etapa determina as propriedades termofísicas do nanofluido. A quarta e última etapa avalia o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga durante o escoamento do nanofluido na bancada experimental. Estas etapas ilustradas na Fig. 3.1 serão vistas com mais detalhes nas subseções deste capítulo.

Também serão vistos neste capítulo, a descrição dos aparelhos experimentais, as modificações introduzidas na bancada e os procedimentos de teste de validação da bancada.

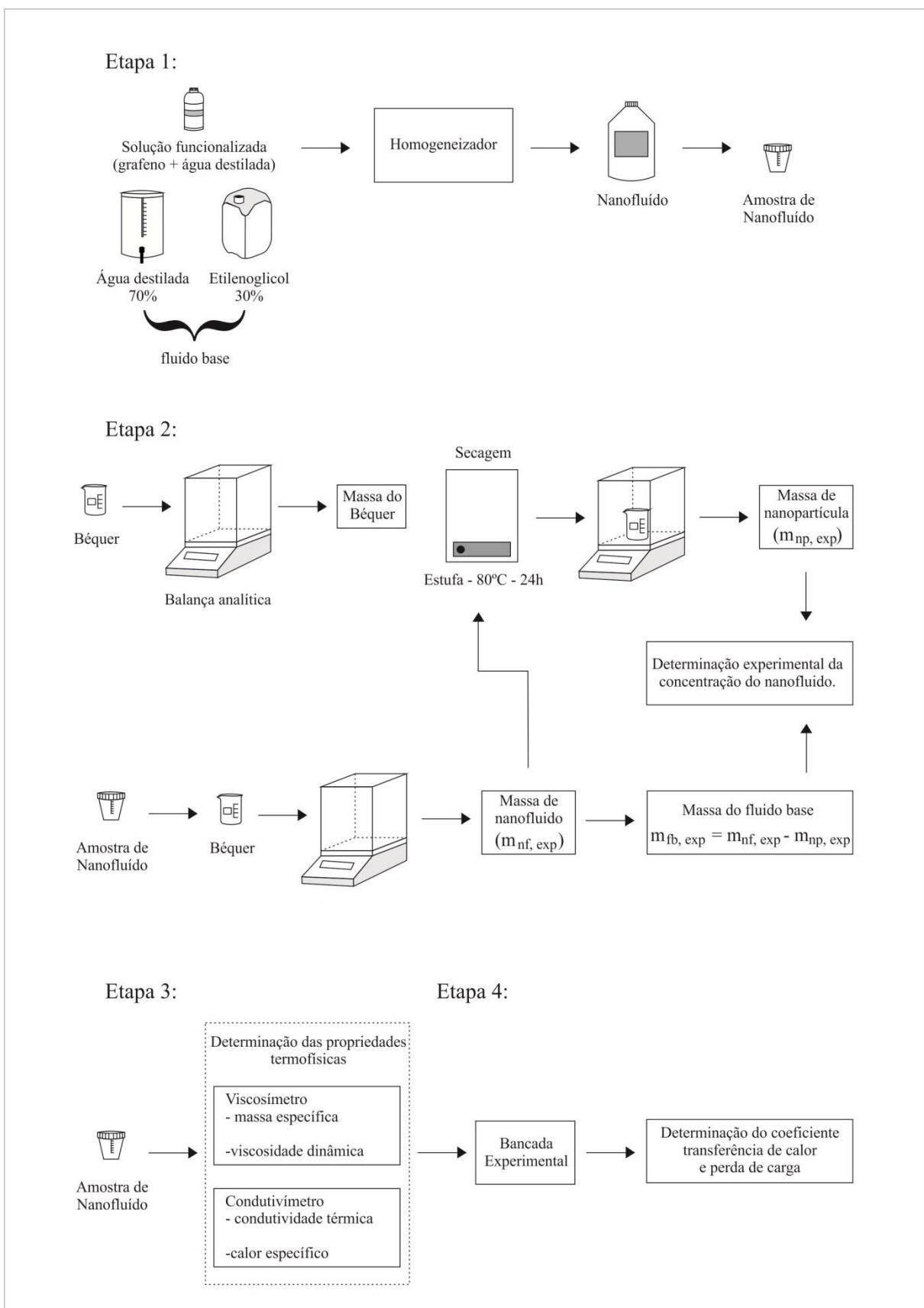


Figura 3.1 - Etapas básicas para determinação experimental do coeficiente de transferência de calor e da perda de carga para nanofluidos.

3.1. Produção de nanofluidos

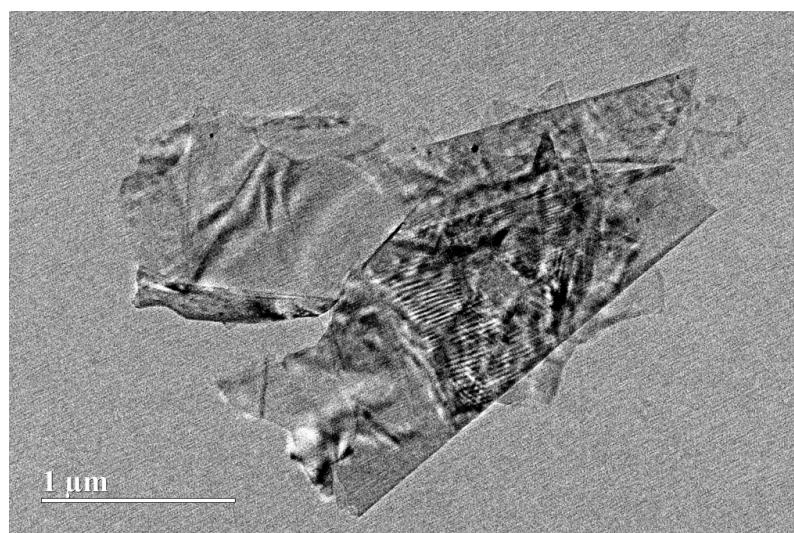
Os nanofluidos foram preparados pelo método de dois passos. Primeiramente, a solução funcionalizada de grafeno em água foi adquirida da *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.* A Tabela 3.1 apresenta a ficha técnica da solução fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Propriedades da solução de grafeno/água.

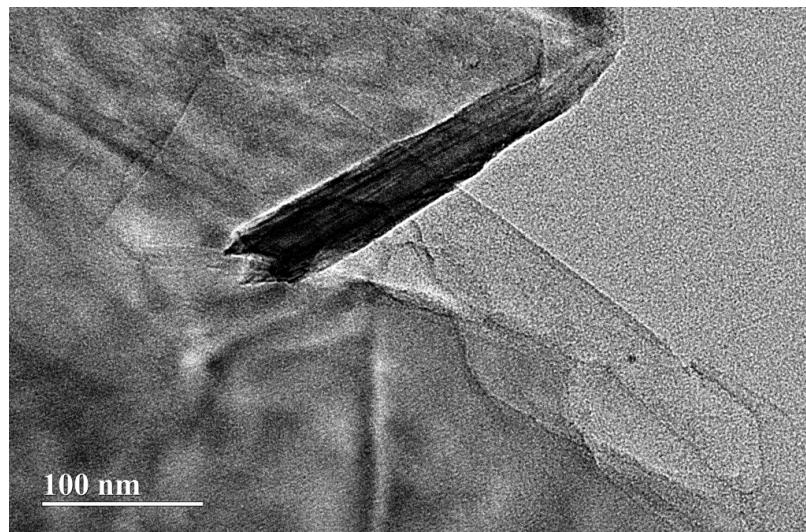
Propriedades	Solução grafeno/água
Espessura da nanopartícula	0,55 - 3,74 [nm]
Pureza	> 90%
Concentração de nanopartículas	10% em massa
Número de camadas	50
Área superficial específica da nanopartícula	> 500 [m ² /g]
Massa específica da nanopartícula	2100 [kg/m ³]
Calor específico da nanopartícula	0,710 [kJ/kgK]
Condutividade térmica da nanopartícula	5000 [W/mK]

Ao verificar a concentração da solução, ela apresentou uma concentração mássica de 6,2%, cujo valor foi utilizado para preparar os nanofluidos. A concentração abaixo do especificado pode ter sido causada pela formação de camadas de nanopartículas na superfície do recipiente.

Algumas amostras foram coletadas para verificar a autenticidade da solução. Pelas imagens obtidas por microscópio eletrônico de transmissão é possível observar claramente, como era esperado, que a estrutura do grafeno é semelhante à uma folha, como mostra a Fig. 3.2a com ampliação de 1 μ m, e sua espessura com ampliação de 100 nm, conforme ilustra a Fig. 3.2b.



(a)



(b)

Figura 3.2 - Imagens obtidas por MET do grafeno que mostram: (a) sua estrutura e (b) sua espessura.

Para determinar o volume de solução que deveria ser utilizado para preparar os nanofluidos, previamente, definiu-se a concentração volumétrica desejada para cada nanofluido ($\phi_{final} = 0,05; 0,1$ e $0,15\%$) e o volume final ($V_{final} = 3200$ ml). Este volume de nanofluido é suficiente para realizar os testes da bancada e utilizar nos equipamentos que determinam as propriedades termofísicas. Logo, pode-se definir o volume das nanopartículas presentes na solução de acordo com a Eq.(3.1).

$$V_{np} = \phi_{final} V_{final} \quad (3.1)$$

Como a massa específica da nanopartícula (ρ_{np}) é conhecida, determina-se a massa de nanopartículas (m_{np}) na solução conforme a Eq. (3.2).

$$m_{np} = V_{np} \rho_{np} \quad (3.2)$$

A massa do fluido base da solução (m_{fb_sol}) é determinada em função da concentração mássica da solução ($wt_{sol}=6,2\%$) com o auxílio da Eq. (3.3).

$$m_{fb_sol} = \frac{m_{np} (1 - wt_{sol})}{wt_{sol}} \quad (3.3)$$

Assim, a Eq. (3.4) determina o volume do fluido base da solução (V_{fb_sol}).

$$V_{fb_sol} = \frac{m_{fb_sol}}{\rho_{fb_sol}} \quad (3.4)$$

Onde o fluido base da solução é água, logo $\rho_{fb_sol} = 997,2 \text{ kg/m}^3$ a 25°C .

Finalmente, encontra-se o volume de solução necessário para preparar o nanofluido com a concentração desejada. Este volume é dado pela soma do volume de nanopartículas (V_{np}) e do volume do fluido base da solução (V_{fb_sol}), como apresenta a Eq. (3.5).

$$V_{sol} = V_{np} + V_{fb_sol} \quad (3.5)$$

O volume do fluido base que deve ser adicionado (mistura de água e etilenoglicol puro numa concentração 70:30) é dado pela Eq. (3.6). Consequentemente pode-se determinar também a massa do fluido base adicionado conforme a Eq. (3.7).

$$V_{fb_ad} = V_{final} - V_{sol} \quad (3.6)$$

$$m_{fb_ad} = \rho_{fb_ad} V_{fb_ad} \quad (3.7)$$

Onde a massa específica do fluido base adicionado (ρ_{fb_ad} = água/etenoglicol – 70:30) a 25°C é de 1043,3 kg/m³.

Logo, o volume de etilenoglicol (V_{EG}) e o volume de água destilada (V_{H_2O}) que devem ser utilizados para preparação do nanofluido é dado pelas Eqs.(3.8) e (3.9), respectivamente.

$$V_{EG} = 0,3 V_{fb_ad} \quad (3.8)$$

$$V_{H_2O} = 0,7 V_{fb_ad} \quad (3.9)$$

É necessário fazer uma consideração no volume do fluido base que deve ser adicionado, uma vez que, o fluido base da solução é apenas água, enquanto do fluido base que deve ser adicionado é uma mistura entre água e etilenoglicol, ou seja, existe um excesso de água. Assim, para que o fluido base do nanofluido tenha exatamente a concentração do fluido base adicionado é necessário acrescentar um volume de etilenoglicol e remover de água.

$$V_{EG_Acr} = V_{H_2O_Red} = 0,3 V_{fb_sol} \quad (3.10)$$

Finalmente, o volume final do etilenoglicol e da água destilada podem ser encontrados com as Eqs.(3.11) e (3.12).

$$V_{EG_final} = V_{EG} + V_{EG_Acr} \quad (3.11)$$

$$V_{H_2O_final} = V_{H_2O} - V_{H_2O_Red} \quad (3.12)$$

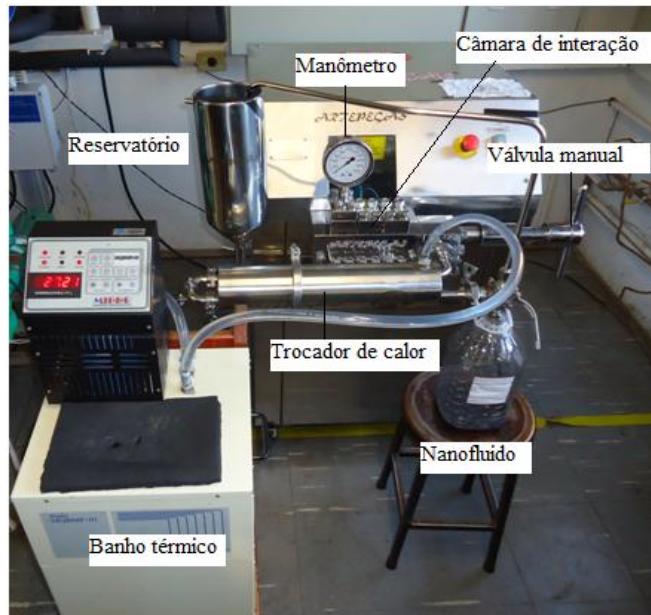
Vale informar que através de observações experimentais percebeu-se que é necessário considerar um acréscimo de 10% na concentração da solução, isto porque por mais que todos os cuidados sejam tomados, algumas partículas ficam retidas nos equipamentos (pipetadores, homogeneizador, etc.), assim por se tratar de uma massa muito pequena de nanopartículas (<0,1 g) qualquer pequena diferença na massa pode originar um nanofluido com concentração bastante diferente do desejado. Este procedimento já é padrão no laboratório e também foi utilizado nos trabalhos de Hoffman (2014), Alegrias (2014) e Cárdenas (2015). Assim, a Tabela 3.2 mostra as condições adotadas para produção dos nanofluidos.

Tabela 3.2 - Definição dos volumes necessários para produção dos nanofluidos.

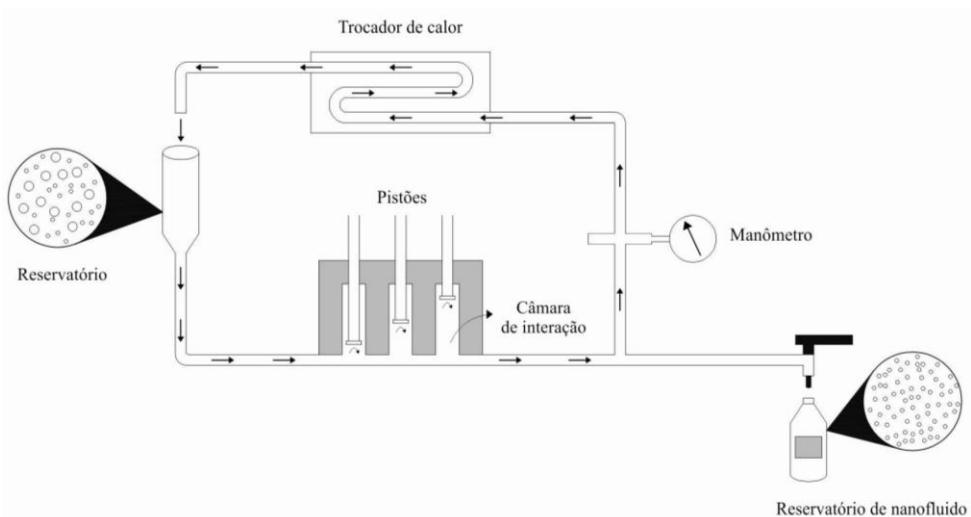
Volume [ml]	$\phi = 0,055\%$	$\phi = 0,110\%$	$\phi = 0,165\%$
Solução	113,9	227,8	341,7
Água destilada	2126,6	2013,3	1899,9
Etilenoglicol	959,5	958,9	958,4
Total (Final)	3200,0	3200,0	3200,0

O segundo passo é dispersão da solução no fluido base. Para isso, o equipamento utilizado foi um homogeneizador de alta pressão disponível no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia, LESTnano, adquirido da empresa *Artepeças Ltda*. O equipamento possui um reservatório de aproximadamente 4L, o suficiente para depositar todo o volume da amostra de nanofluido, 3,2L. Após ligar o equipamento, a amostra segue para câmara de interação na qual a pressão exercida pelos pistões sobre a amostra é controlada por uma válvula manual, cujo valor da pressão pode ser visualizado pelo manômetro. O processo de homogeneização é realizado pelo acionamento dos três pistões que aplicam uma pressão de 400 bar, valor suficiente para homogeneizar e não aquecer excessivamente a amostra, pois as forças de atrito resultante das altas taxas de cisalhamento entre os pistões e o fluido que está sendo homogeneizado eleva a temperatura da amostra. Isto pode provocar a sedimentação das nanopartículas, bem como, elevar a taxa de evaporação do fluido, e consequentemente, implicar em mudanças

significativas na concentração que se deseja obter. Assim, o equipamento possui um trocador de calor que funciona em conjunto com um banho térmico inicialmente mantido a 5°C para controlar a temperatura da amostra durante o processo. A Figura 3.3a mostra o equipamento utilizado na preparação das amostras e a Fig. 3.3b demonstra como é realizado o processo.



(a)



(b)

Figura 3.3 - Homogeneizador de alta pressão. (a) Equipamento em operação. (b) Esquema do processo de homogeneização.

O tempo utilizado para a homogeneização das amostras variou entre 40 e 50 minutos. Este foi o intervalo de tempo necessário para que a temperatura do banho térmico atingisse cerca de 30 °C. A limpeza do homogeneizador foi realizada nos intervalos de produção de uma amostra para outra com a utilização de água destilada circulando por tempo igual ao utilizado para produzir o nanofluido. A seqüência de produção partia do nanofluido de menor concentração para o de maior concentração. Esta tática foi adotada, pois apesar da lavagem com água destilada é possível que nanopartículas acumulem no interior do equipamento.

Finalmente, após a preparação das amostras, a concentração do nanofluido foi verificada através das análises gravimétricas por evaporação de pequenas amostras como ilustrou a Fig. 3.1 na etapa 2. A concentração mássica é determinada de acordo com a Eq.(3.13), em função da massa de nanopartículas e do fluido base determinados experimentalmente, $m_{np,exp}$ e $m_{fb,exp}$, respectivamente.

$$wt_{nf} = \frac{m_{np,exp}}{m_{nf,exp}} = \frac{m_{np,exp}}{m_{np,exp} + m_{fb,exp}} \quad (3.13)$$

Portanto, a concentração volumétrica é definida pela Eq.(3.14).

$$\phi_{nf} = \frac{\frac{m_{np,exp}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np,exp}}{\rho_{np}} + \frac{m_{fb,exp}}{\rho_{fb}}} \quad (3.14)$$

A Tabela 3.3 apresenta a concentração final das amostras após análises gravimétricas por evaporação.

Tabela 3.3 - Concentração das amostras de nanofluido após produção.

Amostra	ϕ [%] (desejado)	ϕ [%] (obtido)	wt [%] (obtido)
1	0,150	0,153	0,308
2	0,100	0,104	0,208
3	0,050	0,053	0,107

Após a produção, foram separadas pequenas amostras em tubos de ensaios para avaliar a estabilidade. A Figura 3.4 mostra que após 30 dias, as amostras apresentavam leve sedimentação de nanopartículas no fundo do recipiente.

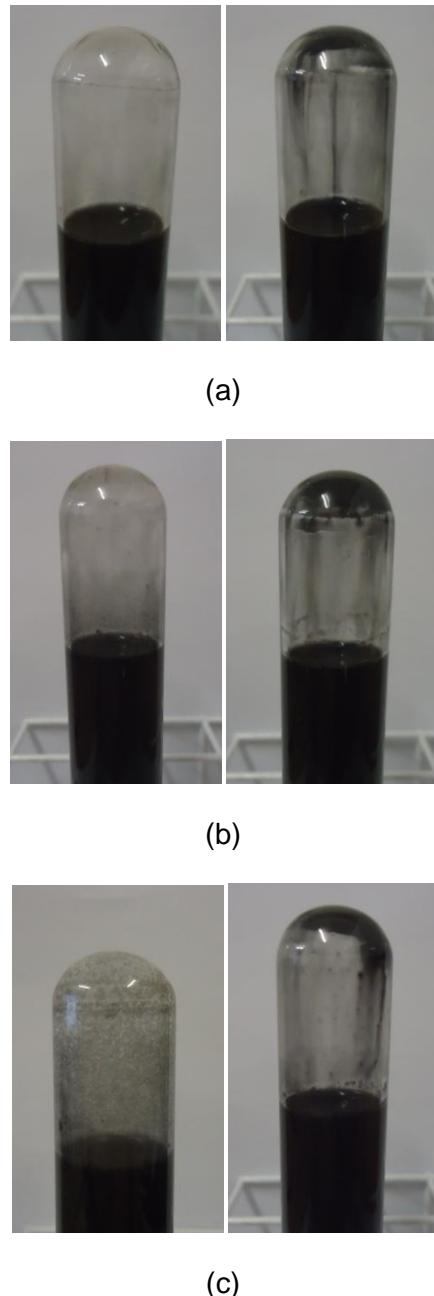


Figura 3.4 - Imagens dos nanofluidos registradas no dia da produção, à esquerda, e após 30 dias, à direita. (a) $\phi=0,05\%$.(b) $\phi = 0,10\%$. (c) $\phi = 0,15\%$.

Vale ressaltar que existem técnicas mais avançadas, como análise do potencial Zeta e método de microscopia absoluta que podem ser utilizados para avaliar a estabilidade de nanofluidos com mais credibilidade.

3.2. Medição das propriedades termofísicas

3.2.1. Método transiente do fio quente

O método transiente do fio quente (do inglês, *Transient Hot Wire*-THW) foi utilizado para determinar a condutividade térmica das amostras de nanofluido e do fluido base.

O método THW é uma técnica baseada na medição do aumento da temperatura de uma fonte de calor linear (fio). Para uma formulação matemática do método, o fio quente é assumido ser uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina, a qual está envolvida pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar. A sonda é conectada a uma fonte de voltagem contínua, que mantém corrente elétrica constante ao longo do fio; assim, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pelo fio e vai se propagar através do material. Essa propagação de calor num meio infinito gera, no material, um campo transiente de temperatura (SANTOS, 2002). O aumento transiente da temperatura no fio, medida através do termopar no intervalo de tempo da realização do experimento depende da condutividade térmica do líquido circundante utilizado no teste. Portanto, o modelo matemático é representado pela Eq. (3.15).

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2 C}\right) \quad (3.15)$$

Sendo q a quantidade constante de calor por unidade de tempo e por unidade de comprimento do fio, r é a distância radial a partir do fio quente, t é o tempo considerado a partir da liberação da corrente, k é a condutividade térmica do material cuja condutividade pretende-se determinar, α é difusividade térmica do fluido de teste e $C = e^\lambda$ e $\lambda = 0,5772157$.

Duas considerações que devem ser feitas durante a realização do experimento:

1) A Equação (3.15) mostra que a temperatura próximo ao fio quente é proporcional ao logaritmo do tempo, e a condutividade térmica do meio está contida na constante de

proporcionalidade. Isso indica que a condutividade térmica pode ser calculada a partir do coeficiente angular da reta temperatura versus logaritmo do tempo. Entretanto, como a fonte de calor (fio quente) não é ideal e, portanto, tem uma certa capacidade térmica, assim, como existe uma resistência de contato entre o fio e a amostra, o trecho inicial da curva não é linear, e portanto não deve ser considerado no cálculo da condutividade térmica (SANTOS, 2002).

2) A sonda deve estar centralizada dentro do recipiente, uma vez que, a distância radial também é considerada na Eq. (3.15).

Foi utilizada a sonda Hukseflux TP-08, disponível no laboratório de refrigeração da EESC-USP. Ela é indicada para a avaliação de materiais com condutividade térmica entre 0,1 e 6 [W/m°C]. A aquisição de dados foi efetuada utilizando placas de aquisição da *National Instruments* e programação em *LabVIEW*. A montagem do aparato experimental é ilustrada na Fig. 3.5.

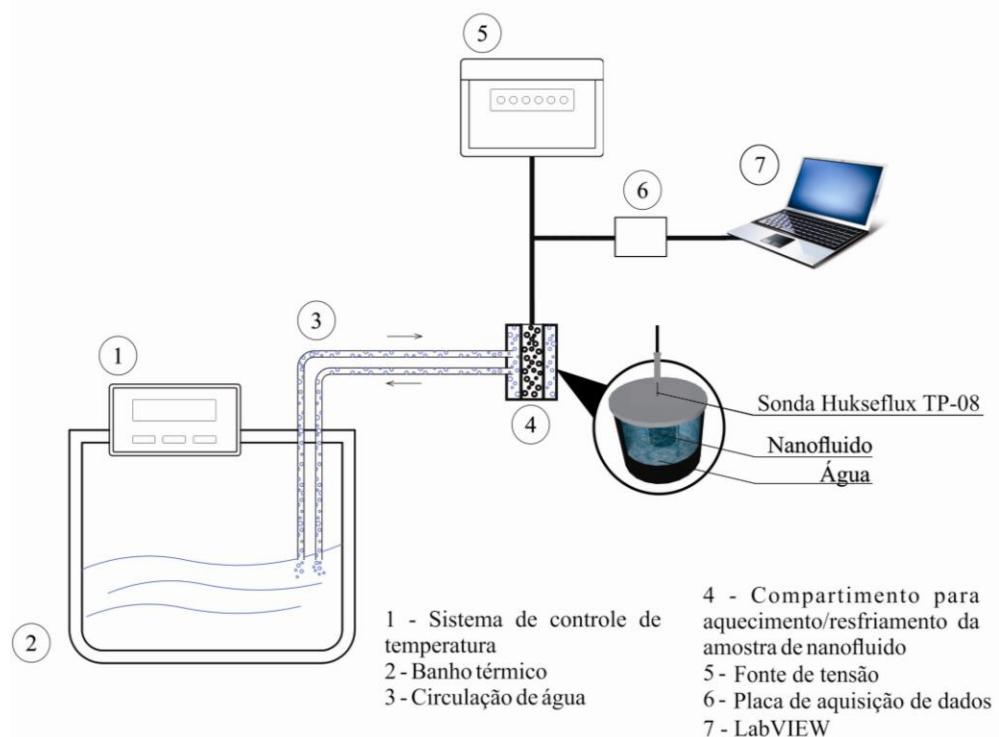


Figura 3.5 - Configuração experimental para determinação da condutividade térmica.

3.2.2. Viscosímetro

A massa específica e a viscosidade dinâmica das amostras de nanofluidos e do fluido base foram determinadas com o auxílio do viscosímetro fabricado pelo *Anton Paar* (Modelo Stabinger™ SVM™ 3000) do tipo rotacional com cilindros concêntricos. O princípio de operação do equipamento é uma modificação do sistema Couette, com um tubo externo de rotação rápida e outro de medição interna, com uma rotação mais lenta. Com uma pequena quantidade de amostra (~2,5 ml) é possível determinar as propriedades da amostra.

A pequena célula de medição da viscosidade dinâmica contém um tubo em rotação com velocidade constante. Este tubo é preenchido com a amostra. Outro tubo com um imã integrado (rotor) flutua na amostra. Devido à baixa densidade do rotor, ele é mantido centrado pela força centrípeta como ilustra a Fig. 3.6.

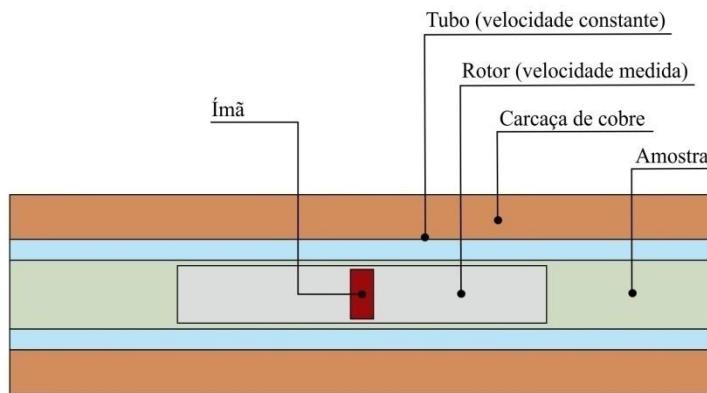


Figura 3.6 - Célula de medição da viscosidade dinâmica.

O imã localizado no rotor cria um campo de corrente induzida com um momento de frenagem exato em função da revolução. Pouco depois do início da medição, o rotor atinge uma velocidade constante. Isto é determinado pelo equilíbrio entre o efeito de frenagem da corrente induzida e entre as forças de cisalhamento da amostra. A viscosidade dinâmica é calculada através da velocidade do rotor e das forças de cisalhamento da amostra.

O equipamento 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 numa única operação. As medições são realizadas simultaneamente. A Figura 3.7 apresenta o viscosímetro utilizado neste trabalho.



Figura 3.7 - Configuração experimental para determinação da massa específica e da viscosidade dinâmica.

3.3. Bancada experimental

A bancada experimental que se encontra no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia foi elaborada de forma semelhante às unidades experimentais de Ding *et al.* (2006), Fotukian e Esfahany (2010) e Kumaresan *et al.* (2013) desenvolvidas para o estudo da transferência de calor por convecção com nanofluidos. Inicialmente construída por Paz (2014) e posteriormente modificada por Cárdenas (2015) ela permite determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção e a perda de carga do sistema sob as condições de convecção forçada e fluxo de calor constante através do escoamento do nanofluido em um tubo reto e horizontal de seção circular.

As condições fluidodinâmicas e térmicas para a solução do problema experimental proposto neste trabalho são estabelecidas pelos equipamentos distribuídos ao longo da bancada experimental. A principal modificação para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada no sistema de refrigeração. A Figura 3.8 mostra uma visão geral da bancada composta por: seção de testes, sistema de refrigeração, sistema para medição da vazão mássica, sistema de pré-aquecimento e rede de aquisição de dados.

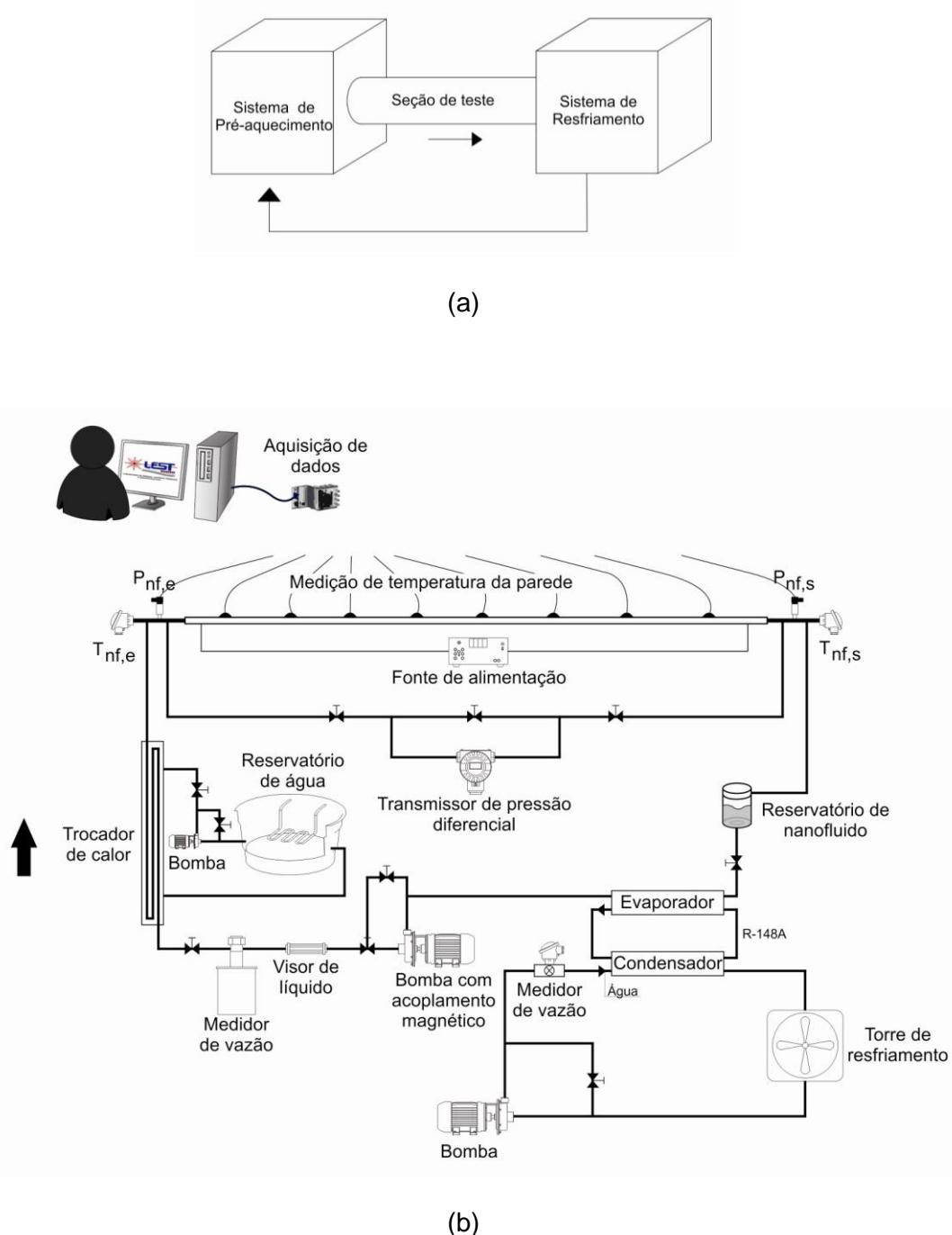


Figura 3.8 - Representação da bancada experimental. a) Resumo do circuito. b) Principais componentes.

Assim, a bancada possui os atributos necessários para avaliar o desempenho termohidráulico do nanofluido. Nas subseções seguintes cada um dos componentes serão abordados com mais detalhes.

3.3.1. Seção de testes

A seção de testes é constituída de um 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, espessura de parede de 3,175 mm e um comprimento total de 2480 mm.

Para a medição de temperatura na parede do tubo da seção de testes utiliza-se 24 termopares do tipo T (modelo *TT-T30SLE*, fornecidos pela *OMEGA ENGINEERING, INC.*) distribuídos em 8 pontos ao longo da parede externa do tubo, deste modo, cada um dos 8 pontos contém 3 termopares em posições previamente definidas de acordo a metodologia proposta por Smout (1996), como mostra a Fig. 3.9.

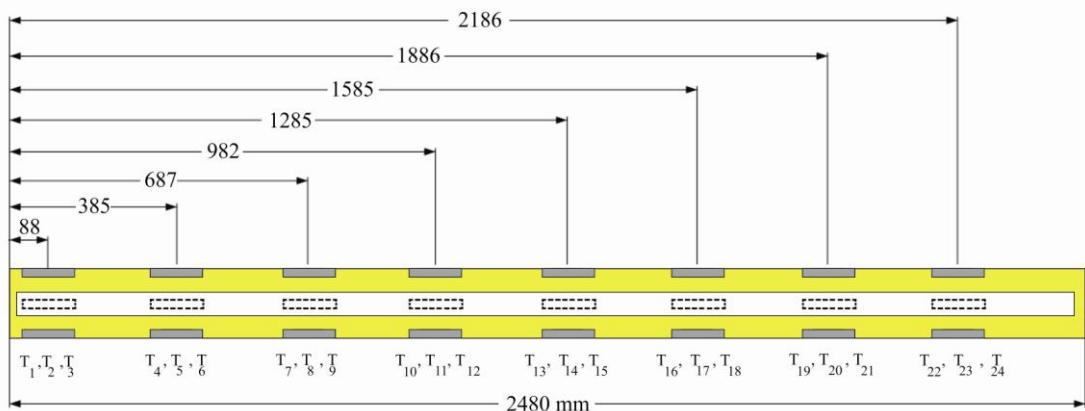


Figura 3.9 - Posição de instalação dos termopares na parede do tubo da seção de testes.

A cada ponto foram confeccionadas ranhuras que permitissem fixar os termopares de forma paralela ao tubo. A posição dos termopares e a dimensão das ranhuras estão apresentadas na Fig. 3.10.

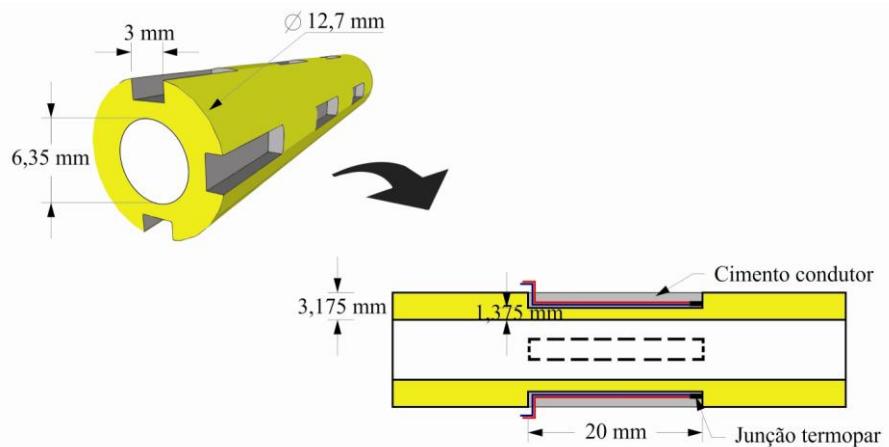


Figura 3.10 - Dimensões da tubulação e da ranhura.

Os termopares foram fixados nas ranhuras com o auxílio de cola instantânea. Vale ressaltar que anteriormente a condutividade da corrente entre os dois fios dos termopares foram verificadas. Após a secagem da cola, a ranhura foi coberta com cimento condutor tipo CCC 60-OMEGA (fornecido pela OMEGA ENGINEERING, INC.). A Figura 3.11 mostra como foi realizada a fixação dos termopares no tubo da seção de testes.



Figura 3.11 - Fixação dos termopares na superfície do tubo. Cárdenas (2015).

Em seguida, para a obtenção de um fluxo de calor constante sobre a superfície do tubo, a sua área externa foi revestida por 12 resistências elétricas do tipo fita flexível, isolada com poliamida, modelo KH série 115 Volts 10W/in² (fornecidas por OMEGA ENGINEERING, INC.) fixadas com o auxílio de fita adesiva de poliamida (kapton- DUPONT®). A Figura 3.12 mostra que as resistências utilizadas conseguiram cobrir toda a área externa do tubo destinada aos testes.



Figura 3.12 - Fixação das fitas flexíveis na superfície do tubo. Cárdenas (2015).

Finalmente, toda a seção de testes foi isolada termicamente com uma camada de lã de rocha de 25 mm de espessura e com espuma elastomérica com espessura de 20 mm (HOFFMANN, 2014).

A potência elétrica necessária para aquecer as fitas resistivas é proveniente de uma fonte de energia controlada por meio de um variador de tensão monofásico (Variac) de 10 kVA e corrente máxima de 40A, modelo *JNG-TDGC2-10* (fornecido por *iTesT Medição e Automatização Ltda.*). A leitura da potência elétrica é realizada por um sensor linear integrado de corrente modelo *ACS712x20A*, baseado no efeito hall. A corrente e a tensão medidas pelo sensor são conferidas continuamente com o auxílio de um amperímetro *MESCO – DM-890* e um multímetro digital (*PC-COMM MINIPA ET-2715 A - BRYMEN*), respectivamente. O conjunto do sistema de aquecimento da seção de testes é ilustrado pela Fig. (3.13).



Figura 3.13 - Equipamentos (Variac, amperímetro e multímetro digital) do sistema de aquecimento da seção de testes.

Nas extremidades da seção de testes foram instalados dois transmissores de temperatura RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detector*) modelo PT100 de três fios (fornecidos por *IOPE Instrumentos de Precisão Ltda.*) para realizar as medidas da temperatura média do fluido. Estes transmissores foram fixados a um suporte de nylon e estrategicamente posicionados entre as junções das tubulações que entram e saem da seção de testes como mostra a Fig. 3.14. O ângulo de 90° formado por cada junção permite a formação de uma zona turbulenta, deste modo, resultados mais precisos podem ser obtidos, uma vez que, a região de turbulência homogeneíza a temperatura do fluido.

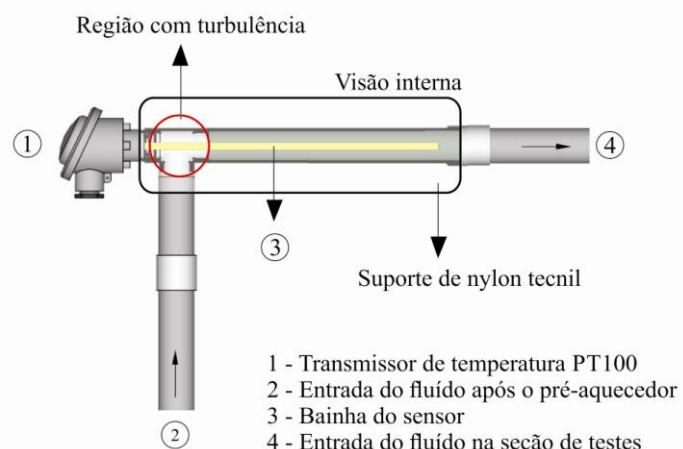
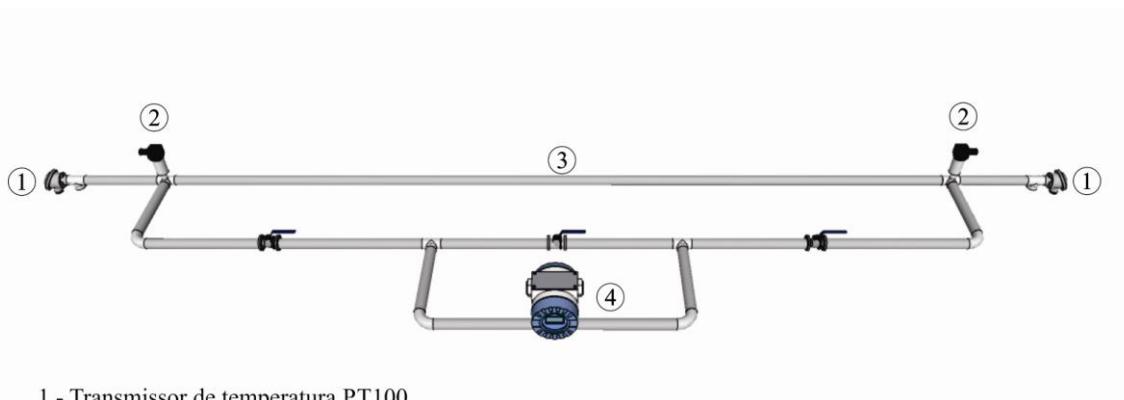


Figura 3.14 - Fixação dos transmissores de temperatura nas extremidades da seção de testes.

A seção de testes possui ainda 3 transmissores de pressão. Os 2 transmissores de pressão de efeito piezo resistivo (modelo *PSI 40*, fabricado pela *Zurich*) são responsáveis pela medição da pressão manométrica que entra e sai da tubulação. Ambos estão fixados em suportes de nylon que além de protegê-los do aquecimento, impedem a perda de calor axial pela tubulação. O terceiro transmissor (modelo *Deltabar S PMD75* fornecido por *Endress+Hauser*) informa a perda de carga diferencial. A Figura 3.15 mostra como os equipamentos estão dispostos na seção de testes.



- 1 - Transmissor de temperatura PT100
- 2 - Transmissor de pressão
- 3 - Seção de testes
- 4 - Transmissor de pressão diferencial

Figura 3.15 - Disposição dos equipamentos na seção de testes.

3.3.2. Sistema de refrigeração

O calor que o nanofluido recebe na seção de testes é removido pelo sistema de refrigeração para que as condições de operação sejam restabelecidas.

O ciclo do sistema de refrigeração é composto por quatro elementos principais: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. A circulação de fluido refrigerante (R-438A) é realizada através de um compressor (modelo K1- C131GEJBBA, fornecido pela *Teco Electric & Machinery Ltda.*). Antes do compressor, encontra-se um trocador de calor do tipo tubos concêntricos, denominado de evaporador, onde no interior do tubo circula o refrigerante, e no espaço anular, o nanofluido. O condensador também foi confeccionado com tubos concêntricos. No espaço anular do condensador circula água que remove calor do fluido refrigerante e desloca para torre de resfriamento. Ao sair do condensador, o R-438A segue para a 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 (Fig. 3.16).

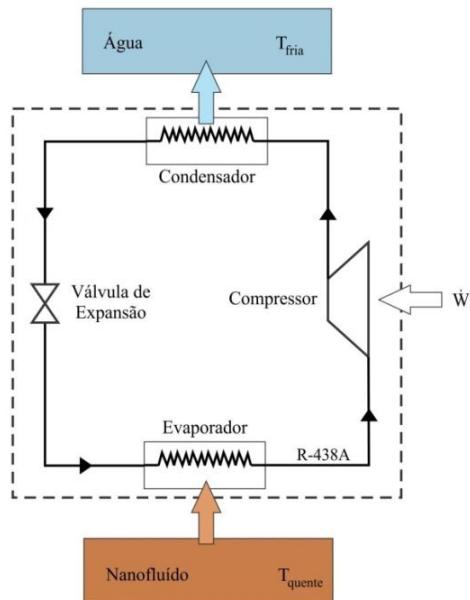


Figura 3.16 - Esquema do Sistema de refrigeração.

Os elementos secundários do sistema de refrigeração são um acumulador de sucção e um separador de óleo. Antes do compressor está instalado o acumulador de sucção (modelo DAS-204, fabricado pela *Du Gold*) utilizado para evitar que o líquido refrigerante retorne para o compressor. Após o compressor existe um separador de óleo (modelo SO-55833, fabricado pela *EOS*) utilizado para proporcionar o retorno de óleo ao compressor em todas as condições de funcionamento. O retorno automático de óleo ao compressor melhora a eficiência do sistema, pois reduz a película de óleo nas paredes internas dos tubos do condensador e do evaporador.

O circuito ainda conta com uma bomba hidráulica (modelo B-12 WEG, fornecida pela *Thebe Bombas Hidráulicas*) com rotação de 3500 RPM e vazão máxima de 7 m³/h, um filtro (modelo AT 10 – 1/4F, fabricado pela *Parker*) e um atuador proporcional (modelo LRB24-SR, fabricado pela *Belimo*) que permite controlar a vazão de água automaticamente. A Figura 3.17 ilustra como o sistema foi montado.

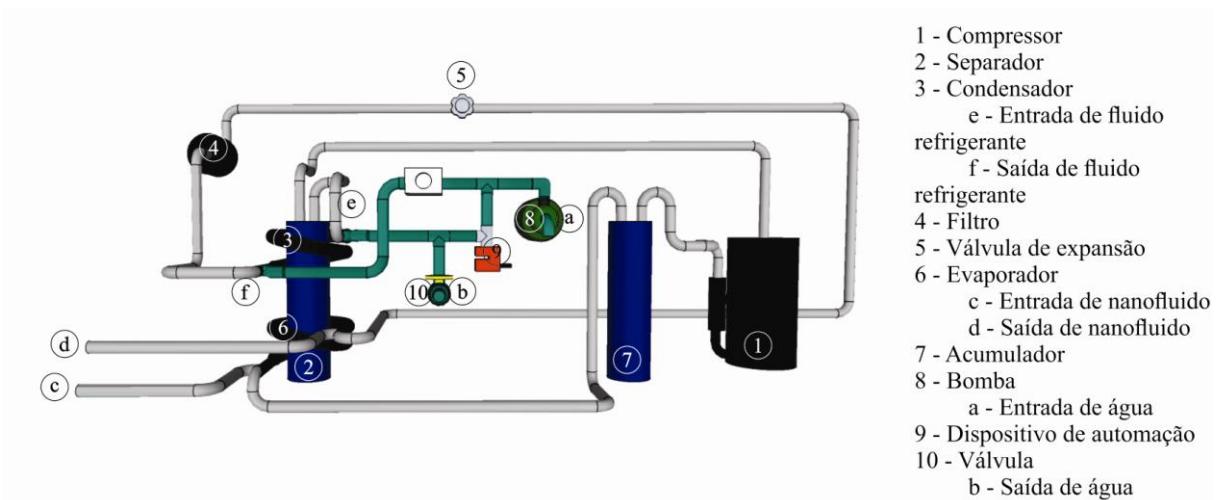


Figura 3.17 - Sistema de refrigeração.

O controle dos parâmetros é realizado através de sensores de temperatura do tipo PT-100 e sensores de pressão piezoresistivos distribuídos por todo sistema. Depois de realizado os testes para verificação de vazamentos e de calibração dos sensores, o sistema de refrigeração foi isolado termicamente por uma camada de 20mm de espuma elastomérica para evitar a troca de calor com o ambiente externo.

3.3.3. Sistema para medição da vazão mássica

A medição da vazão mássica é composta por uma combinação de três equipamentos. A bomba de engrenagens com acoplamento magnético controla a vazão e mantém a circulação do fluido no circuito. O visor de líquido permite observar se ocorre a formação de bolhas ou qualquer outro comportamento estranho durante o escoamento que possa prejudicar a exatidão das medidas. E finalmente, o medidor do tipo Coriolis regista o valor da vazão mássica. A Figura 3.18 mostra como os equipamentos estão interligados na bancada.

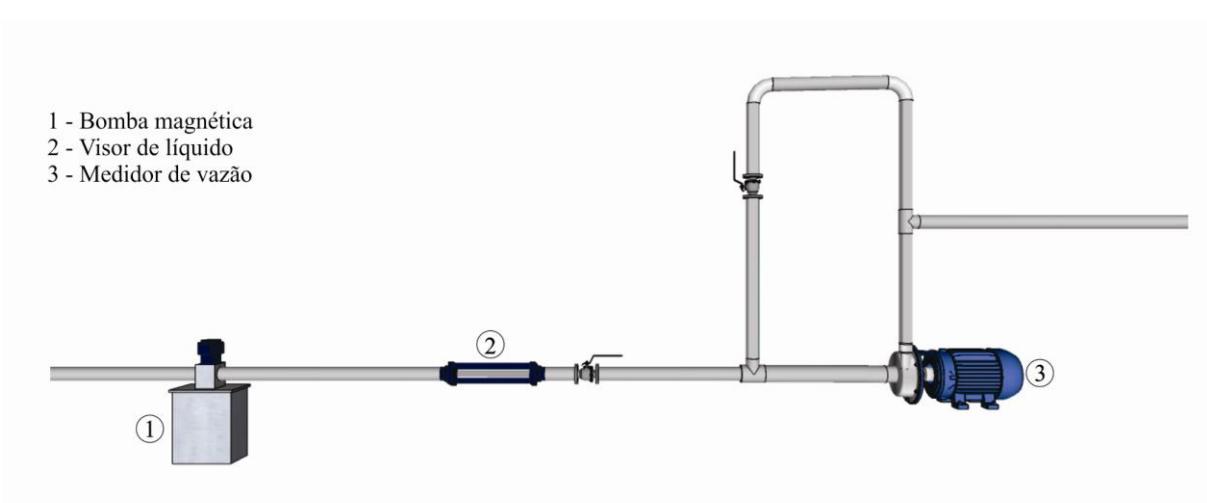


Figura 3.18 - Circuito para medição da vazão mássica.

A energia de alimentação fornecida à bomba de acoplamento magnético de engrenagem não metálicas (*ROTOGEAR MAGNETIC-DRIVE PUMPS*, série 4, modelo 45 fornecida pela *Liquiflo Chemical Precessing Pums Ltd.*) é proveniente de um inverter de frequência (modelo *VLT 2800* fornecido por *Danfoss*). O controle da vazão do fluido é realizado de modo manual diretamente no inverter. O motor de 0,5 CV acoplado à bomba consegue fornecer uma vazão máxima de 13 L/m.

O sensor do tipo coriolis (modelo *RHM06-4F1PS*) e sua respectiva unidade eletrônica (modelo *CMM01*) fornecidos pela *Metroval Controle de Fluidos Ltda.* conseguem operar em uma faixa entre 0,0098 kg/s e 0,01686 kg/s.

Assim, o conjunto destes equipamentos possibilita atingir as condições necessárias para realização das medições da vazão mássica, e caso o sistema ainda apresente condições inadequadas ou mesmo mudanças repentinas na pressão existe um by-pass que pode ser manipulado com o auxílio de uma válvula.

3.3.4. Sistema de pré-aquecimento

O circuito de pré-aquecimento é o responsável por adequar a temperatura do fluido nas condições necessárias para entrada na seção de testes. Logo após sair da seção de testes o fluido perde calor ao longo de todo o circuito da bancada, assim, 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 *Eletropolas*), 3 sensores de temperatura, e um trocador de calor casco tubo.

A bomba possui uma potência de 0,5 HP e vazão máxima de 2,1 m³/h, tais condições são suficientes para circular a água através do circuito. A água aquecida por uma resistência elétrica de 9 kW sai do reservatório na temperatura desejada que é controlada por um sensor localizado na entrada do casco do trocador. Quando a água atinge a temperatura desejada, o sensor envia o sinal para o controle que automaticamente interrompe o fornecimento de energia para a resistência elétrica localizada no interior do reservatório.

Após sair do reservatório, a água segue para o trocador casco tubo. O tubo é preenchido com o fluido de teste e o casco com água em corrente oposta ao do fluido. Os fluidos ficam separados e o calor é continuamente transferido da água quente para o fluido através da parede do tubo. Para o controle da troca de calor, um sensor fica na entrada do tubo do trocador para medir a temperatura do fluido antes de passar pelo trocador e os outros sensores, um na entrada e outro na saída do casco do trocador controlam a temperatura da água. Após passar pelo trocador, a água retorna para o reservatório completando o circuito. A Figura 3.19 ilustra a montagem do circuito de pré-aquecimento.

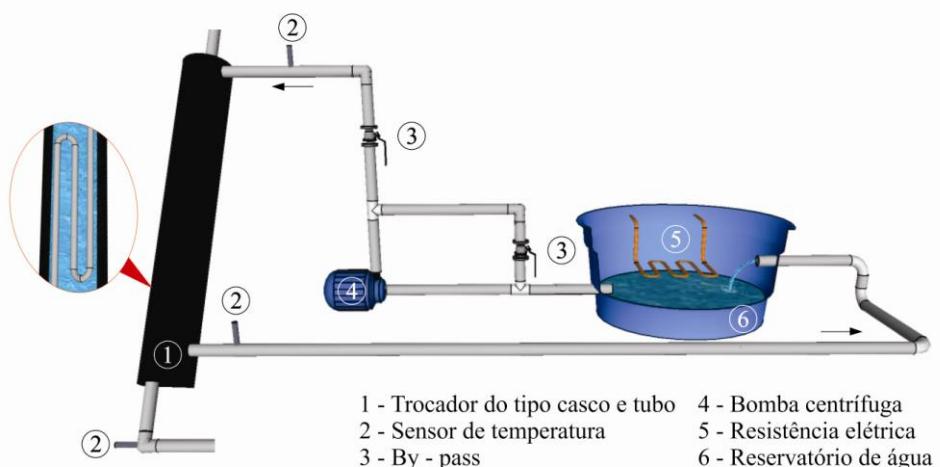


Figura 3.19 - Montagem do circuito de pré-aquecimento.

3.3.5. Medição, monitoramento e aquisição de dados

O sistema de medição, monitoramento e aquisição dos dados é controlado pela interface homem-máquina que permite a comunicação entre os equipamentos e o operador que está monitorando o processo. É através desta interface que as informações são recebidas ou enviadas para os equipamentos da bancada experimental. Deste modo, além de coletar os dados, o operador pode ajustar parâmetros para atender as exigências dos testes ou solucionar as anomalias que podem ocorrer durante o processo.

O sistema de aquisição de dados é composto por um computador com software de programação LabView® e uma placa de aquisição de dados NI cDAQ-9172 que operam conectados aos sensores que foram instalados na bancada, processando os sinais por eles enviados que correspondem às grandezas físicas medidas. A placa de aquisição captura os sinais dos sensores que são monitorados em um painel de controle desenvolvido em LabView®. A cada segundo, o sistema registra um dado resultante da média de 10 leituras em um documento no formato “.txt”.

O painel de controle é formado por três telas principais que monitoram: a seção de testes, o sistema de refrigeração e o sistema de pré-aquecimento. A Figura 3.20 mostra o sistema completo onde as variáveis de interesse são continuamente monitoradas através de gráficos.

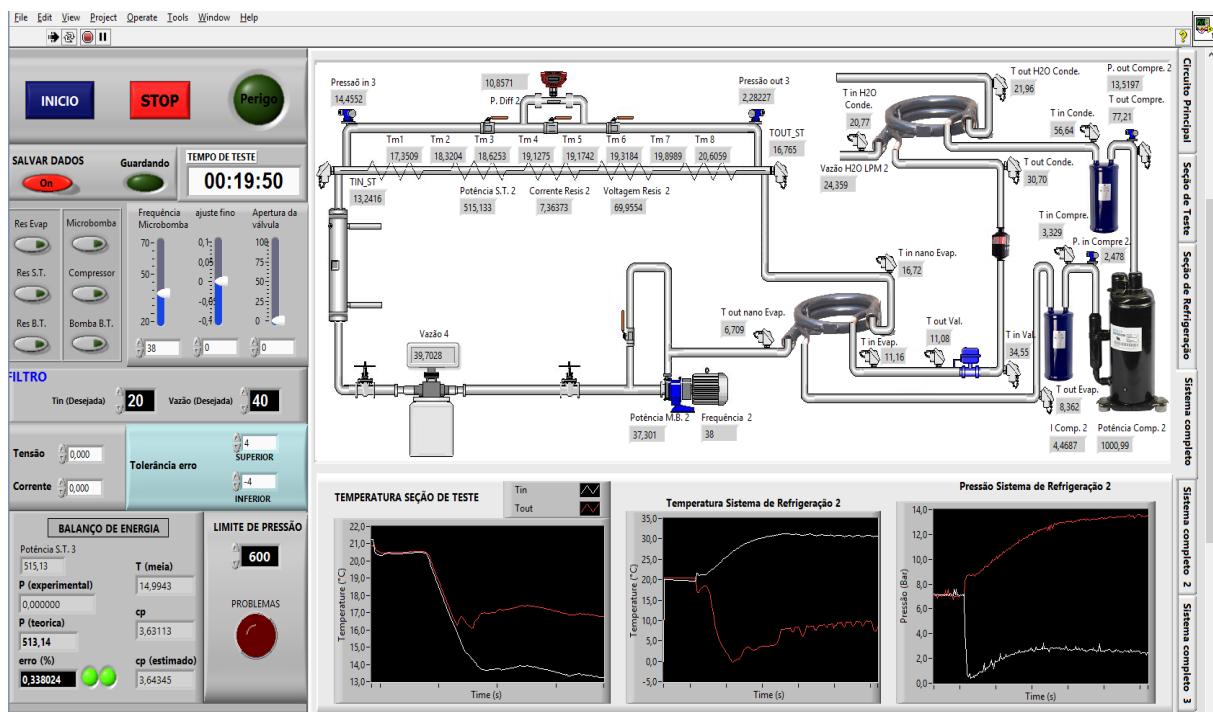


Figura 3.20 - Tela do conjunto completo do sistema de aquisição de dados.

A bancada experimental na sua forma final é apresentada na Fig. 3.21. No APÊNDICE A é apresentado o seu fluxograma de operação.



Figura 3.21 - Montagem completa do equipamento experimental.

Após a conclusão da bancada experimental, foram realizados ensaios iniciais com água destilada para avaliar as condições de operação. Os resultados referentes ao balanço de energia, ao coeficiente de transferência de calor e à perda de carga que mostram a validade do equipamento experimental serão apresentados a seguir.

3.4. Validação da bancada experimental

O objetivo principal da bancada experimental é encontrar o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada para o nanofluido de grafeno. Porém, antes disso, os equipamentos que compõe a bancada precisam mostrar que estão aptos para tal finalidade. Para isso, os testes foram inicialmente validados utilizando água destilada, uma vez que já existem na literatura informações consolidadas que descrevem seu comportamento termo-hidráulico.

A primeira etapa para validação consistiu em encontrar o regime de operação da bancada no qual ela consegue atingir o regime permanente com os parâmetros inicialmente adotados. Os parâmetros que podiam ser manipulados, ou seja, a temperatura de entrada na seção de testes (T_e), a potência elétrica ($Q_{P,E}$) e a vazão mássica (m) eram modificados de acordo com o comportamento da bancada.

O controle dos parâmetros foi conduzido pela manipulação dos dispositivos de operação. A vazão mássica foi controlada por meio da manipulação da válvula by-pass, seguido de um ajuste do variador de frequência da bomba de acoplamento magnético. O ajuste da potência elétrica responsável pelo fluxo de calor foi realizado através da regulagem da tensão de saída do Variac; também foram monitorados os valores de tensão (V) e corrente (I) na saída da fonte de alimentação das resistências elétricas.

A temperatura de entrada na seção de testes foi ajustada após a vazão mássica e a potência elétrica estarem estabelecidas com a bancada em operação. A temperatura de entrada do fluido na seção de testes foi garantida pela manipulação das condições de operação do pré-aquecedor. Através do painel de controle é possível observar o sinal enviado pelo sensor de temperatura instalado na entrada da seção de testes. O sinal de alerta é ativado se a temperatura estiver dentro da variação aceitável de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para o valor de temperatura desejado. Quando esta condição não é atingida, a temperatura do pré-aquecedor é ajustada. Assim, uma vez que o sistema atingi as condições necessárias, são realizados refinamentos que impeçam alterações significativas dos parâmetros, de tal modo que, o regime permanente consiga ser estabelecido e, a partir de então, a aquisição dos dados possa ser iniciada.

As condições de operação foram estabelecidas de acordo com o limite da bancada, respeitando a carga térmica que o sistema de refrigeração conseguia retirar e o valor mínimo e máximo para a vazão mássica que a bomba com acoplamento magnético conseguia atingir.

Assim, a Tabela 3.4 descreve as condições nominais que foram estabelecidas para realização dos testes com água destilada.

Tabela 3.4 - Condições adotadas para os testes com água destilada.

Fluido	$T_{\text{entrada}} [^{\circ}\text{C}]$	$Q_{\text{P.E.}} [\text{W}]$	$\dot{m} [\text{g/s}]$
Água destilada	15	500	20
			30
			40
	20	750	50
			60
			70
	25	1000	80

Foram realizados 63 testes; e a partir da coleta dos dados determinou-se o balanço de energia, a perda de carga e o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada para a água destilada. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com modelos teóricos que permitem estimar estes parâmetros.

A percentagem do desvio relativo (DR%) entre os resultados experimentais e os obtidos por meio dos modelos é calculada pela Eq. (3.16).

$$DR = \frac{|Y_{\text{exp}} - Y|}{Y_{\text{exp}}} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

Onde (Y_{exp}) representa o parâmetro obtido experimentalmente e (Y) o dado teórico.

3.4.1. Volumes de controle

Se o gradiente de temperatura for muito grande pode haver uma variação significativa das propriedades termofísicas (massa específica, calor específico, condutividade térmica e viscosidade dinâmica) do fluido durante todo o escoamento. Consequentemente, uma simples avaliação destas propriedades considerando apenas a média entre a temperatura de entrada e saída da seção de testes poderia conduzir a erros significativos. Neste sentido, foram criados volumes de controle, como ilustra a Fig. 3.22.

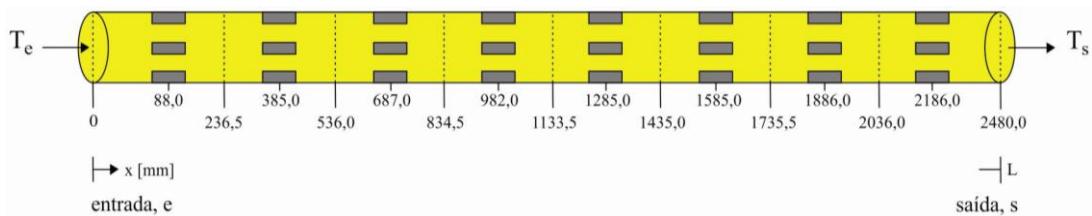


Figura 3.22 - Definição dos volumes de controle.

Assim, as propriedades termofísicas da água destilada foram determinadas por uma temperatura de referência, T_{ref} , dada pela média entre a temperatura de entrada e saída em cada volume de controle como mostra a Eq. (3.17).

$$T_{ref}(x_n) = \frac{T_{m,f}\left(\frac{x_{n+1} - x_n}{2} + x_n\right) + T_{m,f}\left(\frac{x_n - x_{n-1}}{2} + x_n\right)}{2} \quad (3.17)$$

As temperaturas das superfícies de controle (entrada e saída), que correspondem à temperatura média do fluido experimental, $T_{m,f}$, foram determinadas pela Eq.(3.18), que relaciona a temperatura de entrada, T_e , e saída, T_s , da seção de testes com a posição na direção x em que o volume foi delimitado.

$$T_{m,f}(x_n) = \left(\frac{T_s - T_e}{L} \right) x_n + T_e \quad (3.18)$$

Com o auxílio do software EES (do inglês, *Engineering Equation Solver*) foram obtidos os polinômios das propriedades termofísicas da água destilada em função da temperatura, de tal forma que fosse possível definir suas propriedades de acordo com a temperatura de referência determinada pela Eq. (3.17).

Assim pode-se determinar o número de Reynolds, Eq. (3.19), e o número de Prandtl, Eq.(3.20) para cada volume de controle.

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

Onde (\dot{m}) é a vazão mássica, (D) é o diâmetro interno do tubo e (μ) é a viscosidade dinâmica do fluido.

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

Na qual as propriedades do fluido são a viscosidade dinâmica (μ), o calor específico (c_p) e a condutividade térmica (k).

3.4.2. Fator de atrito e perda de carga

Para os valores de vazão mássica que foram estabelecidos para os testes, o número de Reynolds variou numa faixa entre 4000 e 19000, caracterizando o regime de transição para turbulento. No caso de escoamento turbulento em tubos lisos para número de Reynolds inferior a 10^6 , o fator de atrito pode ser estimado com boa exatidão pela equação proposta por Petukhov (1970), descrita pela Eq. (3.21).

$$f(x_n) = [0,79 \ln(\text{Re}(x_n)) - 1,64]^{-2} \quad (3.21)$$

Para faixa de aplicação de $3000 \leq \text{Re} \leq 5 \cdot 10^6$.

O modelo de Blasius, representado pela Eq.(3.22) também foi utilizado para obtenção do fator de atrito.

$$f(x_n) = 0,316(\text{Re}(x_n))^{-0,25} \quad (3.22)$$

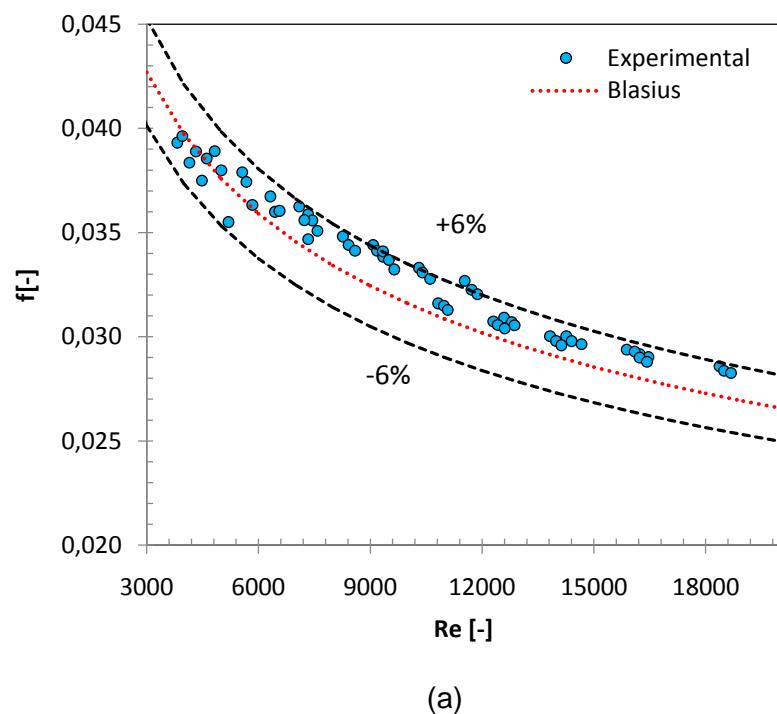
Para faixa de aplicação de $2000 \leq \text{Re} \leq 10^5$.

O fator de atrito experimental foi obtido com o auxílio do modelo de Darcy dado pela Eq. (3.23).

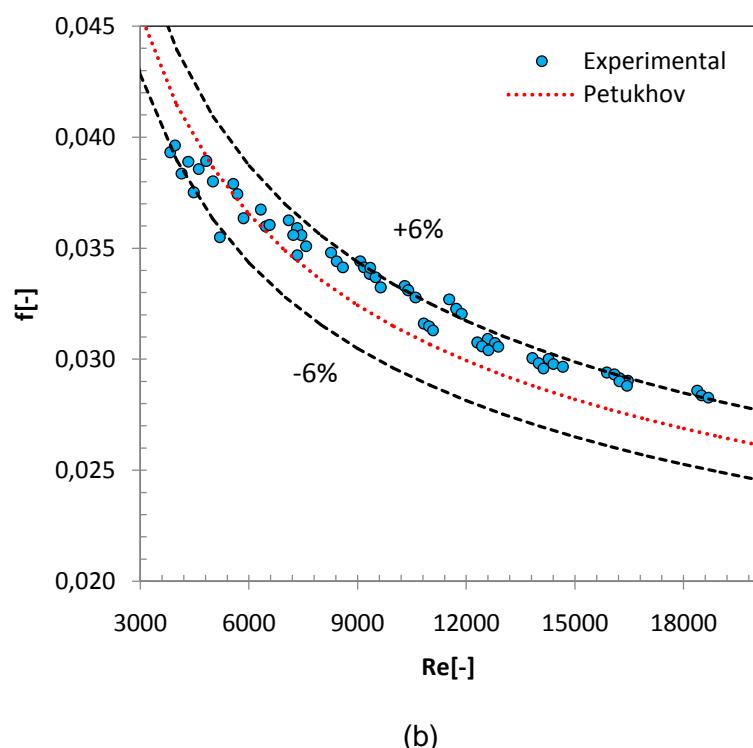
$$f(x_n) = \frac{\Delta P \pi^2 D^5 \rho(x_n)}{8 \dot{m}^2 L} \quad (3.23)$$

Na qual (ρ) é a massa específica, (\dot{m}) a vazão mássica, e (ΔP), (D) e (L) são a diferença de pressão, o diâmetro interno e comprimento da seção de testes, respectivamente.

As Figuras 3.23a e 3.23b apresenta os resultados dos valores médios dos fatores de atrito experimentais e o obtidos por meio dos modelos.



(a)



(b)

Figura 3.23 - Desvio entre o fator de atrito experimental e teórico. (a) Equação de Blasius. (b) Equação de Petukhov.

Observa-se que o desvio para ambos os modelos adotados estão numa faixa entre $\pm 6\%$. Os resultados experimentais apresentaram maior concordância com o modelo de Blasius, sendo que cerca de 80% destes valores estavam num desvio de $+5\%$. O desvio máximo com o modelo de Blasius foi de $+7\%$, enquanto que para o modelo de Petukhov foi de $+8\%$.

Os dados necessários para avaliação da perda de carga experimental poderiam ser obtidos por duas maneiras: pelos transmissores instalados nas extremidades da seção de teste ou pelo transmissor de pressão diferencial. Os dados experimentais do transmissor de pressão diferencial foram utilizados para realizar a validação, uma vez que, os seus respectivos desvios quando comparados com as correlações foram menores.

Na Figura (3.24), apresenta-se a concordância entre a perda de carga experimental por unidade de comprimento em comparação com o mesmo parâmetro obtido através da equação de Darcy com o fator de atrito calculado pelas equações de Blasius e Petukhov. Verifica-se uma proximidade muito boa entre os valores de perda de carga. O desvio de $\pm 6\%$ é considerado “ótimo”.

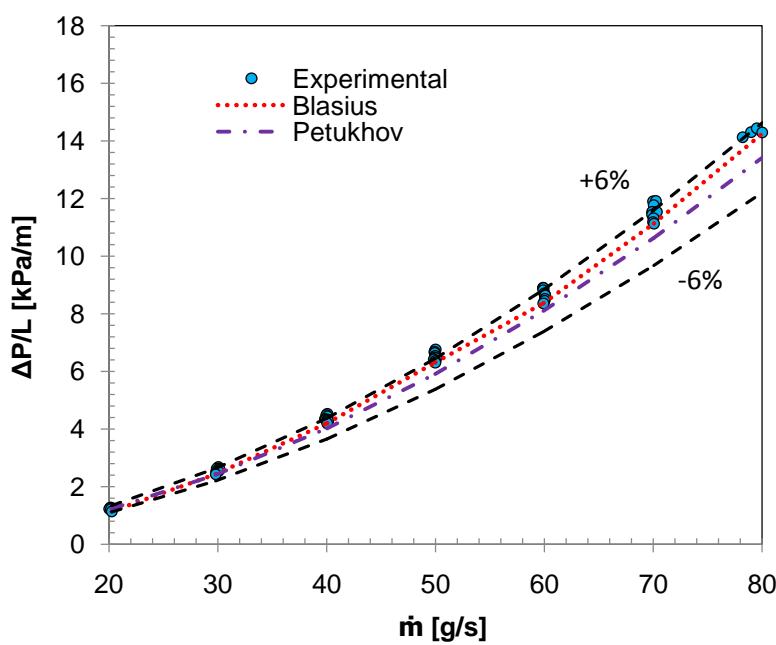


Figura 3.24 - Comparaçāo entre os resultados experimentais e teóricos da perda de carga por unidade de comprimento em função da vazão mássica.

3.4.3. Isolamento da seção de testes

Com o objetivo de avaliar o isolamento da seção de testes, foi realizada uma comparação entre a potência elétrica fornecida para as resistências elétricas ($Q_{P.E.}$), que são responsáveis pelo fluxo de calor na seção de testes e o calor transferido para a água (Q_T) obtido teoricamente pelo princípio de conservação de energia.

O calor que deve ser transmitido para a água por convecção considerando o princípio de conservação de energia de um fluido escoando em regime permanente pode ser determinado com o auxílio da Eq. (3.24).

$$\dot{Q}_T = \dot{m}c_p(T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (3.24)$$

Onde (c_p) é o valor médio para o calor específico da água destilada. A temperatura média na saída, $T_{m,s}$, assim como a temperatura média na entrada, $T_{m,e}$, são obtidas através dos transmissores de temperatura do tipo PT-100 instalados nas extremidades da seção de testes.

A Figura 3.25 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos para a taxa de transferência de calor.

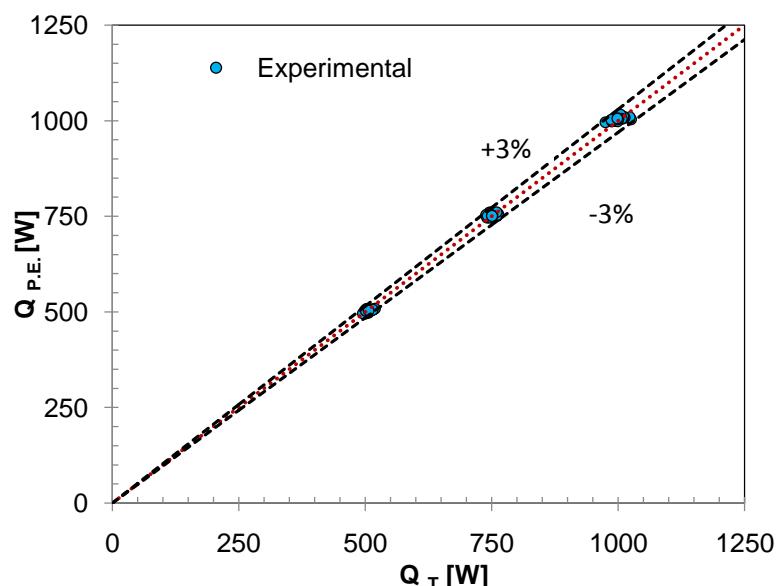


Figura 3.25 - Comparaçao entre a potênciade elétrica experimental e o calor transmitido para água determinado teoricamente.

Como pode ser observado, para os 63 testes, o balanço de energia apresentou um desvio máximo de $\pm 3\%$. Isto mostra que as resistências elétricas responsáveis pelo fluxo de calor na parede do tubo da seção de testes estavam funcionando corretamente e que o isolamento impedia uma perda significativa de calor para o ambiente externo.

3.4.4. Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor local foi determinado para cada volume de controle de acordo com a posição em que cada conjunto de três termopares estava instalado na direção x . Para isso, foi necessário determinar o fluxo de calor, q'' , a temperatura média local do fluido, $T_{m,f}(x)$, a temperatura interna local da parede do tubo, $T_{p,int}(x)$. A Figura (3.26) ilustra a localização das variáveis.

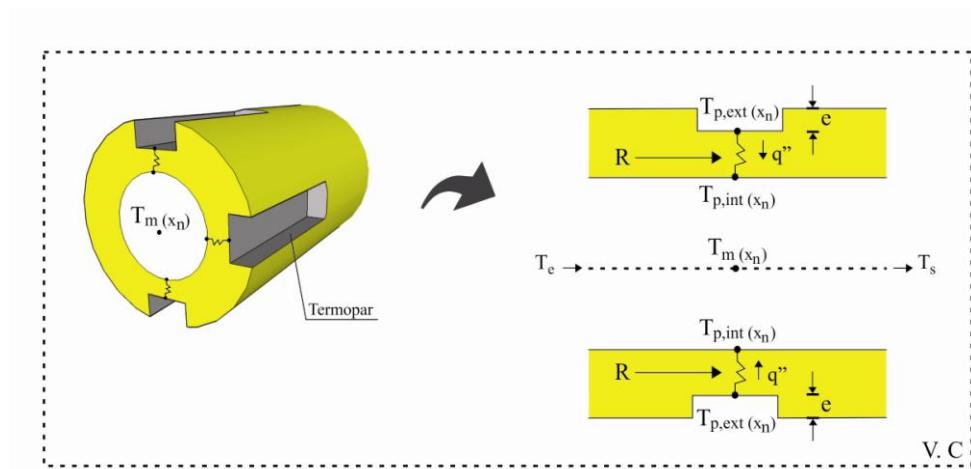


Figura 3.26 - Variáveis de um volume de controle necessárias para o cálculo do coeficiente de transferência de calor.

O fluxo de calor é constante sobre toda superfície e , portanto, independente da direção x . Ele foi obtido pela razão entre a potência elétrica aplicada sobre as resistências ($Q_{P.E.}$) e a área superficial interna da parede do tubo conforme a Eq. (3.25).

$$q'' = \frac{\dot{Q}_{P.E.}}{\pi D L} \quad (3.25)$$

Onde, para seção de testes, (D) é o diâmetro interno e (L) o comprimento total.

Assim, o fluxo de calor resultante da potência elétrica de 500, 750 e 1000 W, foi de 11, 16 e 21 kW/m², respectivamente.

A temperatura local da superfície interna, $T_{p,int}(x)$, foi determinada aplicando o conceito da resistência térmica que modela o processo de condução de calor através da parede da seção de testes de acordo com a Eq. (3.26).

$$T_{p,int}(x_n) = T_{p,ext}(x_n) - \dot{Q}_{P.E.} R_p \quad (3.26)$$

Onde (R_p), calculada pela Eq. (3.27), é a resistência térmica que a parede da seção de testes oferece à transferência de calor.

$$R_p = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2\pi L k} \quad (3.27)$$

Onde (r_{int}) e (r_{ext}) são os raios interno e externo da seção de testes, respectivamente, considerando a espessura na qual o termopar foi instalado. A condutividade térmica do latão (k), material do qual é feito o tubo da seção de testes é determinado com o auxílio de um polinômio obtido com os dados fornecidos pelo software EES (do inglês, *Engineering Equation Solver*) da condutividade térmica do latão em função da temperatura.

Após definida a temperatura local da superfície interna de cada termopar, é realizada a média entre os três termopares localizados em um mesmo ponto na direção x . Portanto, o valor médio encontrado corresponde à temperatura local da superfície interna do respectivo volume de controle.

A temperatura média experimental do fluido, $T_{m,f}$, foi determinada com o auxílio da Eq. (3.18), descrita anteriormente na subseção de volumes de controle.

A Equação (3.28) obtida a partir do princípio de conservação de energia, considerando o fluxo de calor constante sobre a superfície, foi utilizada para efeitos de comparação com os resultados experimentais da temperatura média do fluido.

$$T_m(x_n) = T_e + \frac{q'' \pi D x_n}{\dot{m} c_p} \quad (3.28)$$

Na qual (T_e) é a temperatura de entrada da seção de testes, (q'') é o fluxo de calor, (D) o diâmetro interno da tubulação, (\dot{m}) a vazão mássica e (c_p) o calor específico.

As Figuras (3.27) e (3.28) mostram uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos para temperatura média em função do deslocamento do fluido ao longo do tubo, considerando a variação da temperatura de entrada e do fluxo de calor, respectivamente. O desvio máximo encontrado foi de +0,2% considerando a temperatura de entrada e de +0,3% para o fluxo de calor.

Considerando:

Tentrada = 15 [C]

● Tmf (Experimental) Tmf(Teórico)

Tentrada = 20 [C]

◆ Tmf(Experimental) - - - Tmf(Teórico)

Tentrada = 25 [C]

▲ Tmf(Experimental) - - - Tmf(Teórico)

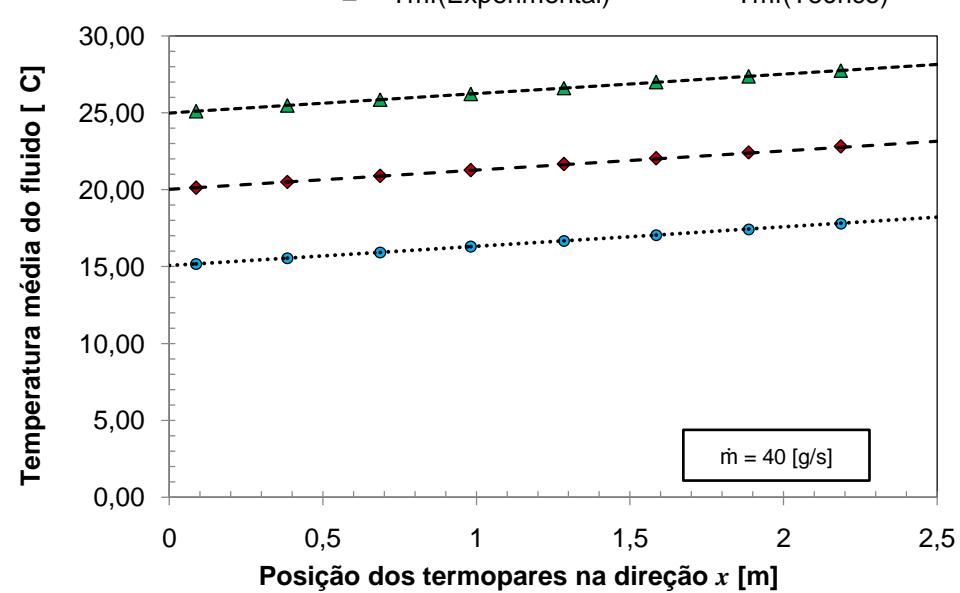


Figura 3.27 - Comparaçāo entre os resultados teóricos e experimentais da temperatura média do fluido ao longo da seção de testes para $q'' = 11$ [kW/m²].

Considerando:

$$q'' = 11 \text{ [kW/m}^2]$$

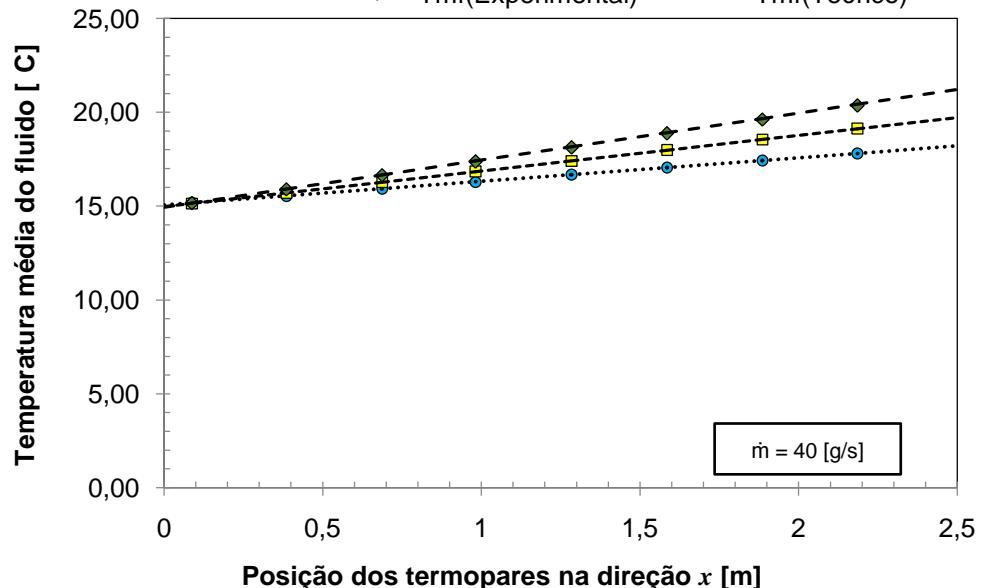
● Tmf(Experimental) Tmf(Teórico)

$$q'' = 16 \text{ [kW/m}^2]$$

■ Tmf(Experimental) - - - Tmf(Teórico)

$$q'' = 21 \text{ [kW/m}^2]$$

◆ Tmf(Experimental) - - - Tmf(Teórico)



(b)

Figura 3.28 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais da temperatura média do fluido ao longo da seção de testes para $T_{\text{entrada}} = 15 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$.

Observe que a temperatura média do fluido aumenta linearmente com o deslocamento, conforme previsto pelo modelo teórico.

Finalmente, o coeficiente de transferência de calor local é determinado experimentalmente pela Eq. (3.29).

$$h(x_n) = \frac{q''}{T_{p,\text{int}}(x_n) - T_{m,f}(x_n)}$$

(3.29)

O coeficiente de transferência de calor médio é determinado pela média entre os coeficientes de transferência de calor obtidos em cada volume, conforme a Eq. (3.30).

$$h_m = \frac{h(x_1) + \dots + h(x_n)}{n} \quad (3.30)$$

A definição destes parâmetros é importante para utilizar as correlações do número de Nusselt que operam dentro da faixa de operação nos quais os testes foram realizados. Os números de Reynolds e Prandtl variaram entre (4000 \leq Re \leq 19000) e (5 \leq Pr \leq 8), respectivamente.

Uma correlação, válida para obter o número de Nusselt em tubos lisos para fluidos escoando em uma ampla faixa de número de Reynolds, incluindo a região de transição, é fornecida por Gnielinski (1975), conforme apresenta a Eq. (3.31).

$$Nu(x_n) = \frac{(f(x_n)/8)(Re(x_n) - 1000)Pr(x_n)}{1 + 12,7(f(x_n)/8)^{0,5}(Pr(x_n)^{2/3} - 1)} \quad (3.31)$$

Para faixa de aplicação de 0,5 \leq Pr \leq 2000, e 3000 \leq Re \leq 5.10⁶. O fator de atrito (f) é determinado pelo modelo de Petukhov (1970) conforme foi descrito pela Eq. (3.21).

A correlação de Dittus-Boelter (Dittus e Boelter, 1930) representada pela Eq. (3.32) também foi utilizada para comparação com os resultados experimentais

$$Nu(x_n) = 0,023 Re(x_n)^{4/5} Pr(x_n)^{2/5} \quad (3.32)$$

Para faixa de aplicação de Re \geq 10⁴ e 0,6 \leq Pr \leq 200.

O número médio de Nusselt é determinado pela média entre os valores encontrados em cada volume de controle, conforme a Eq. (3.33).

$$Nu_m = \frac{Nu(x_1) + \dots + Nu(x_n)}{n} \quad (3.33)$$

O número médio de Nusselt relaciona-se com o coeficiente de transferência de calor médio pela Eq. (3.34).

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} \quad (3.34)$$

Assim, a Figura (3.29), apresenta a comparação entre os valores médios dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor obtidos para a água destilada e os determinados por meio do modelo de Gnielinski (1975).

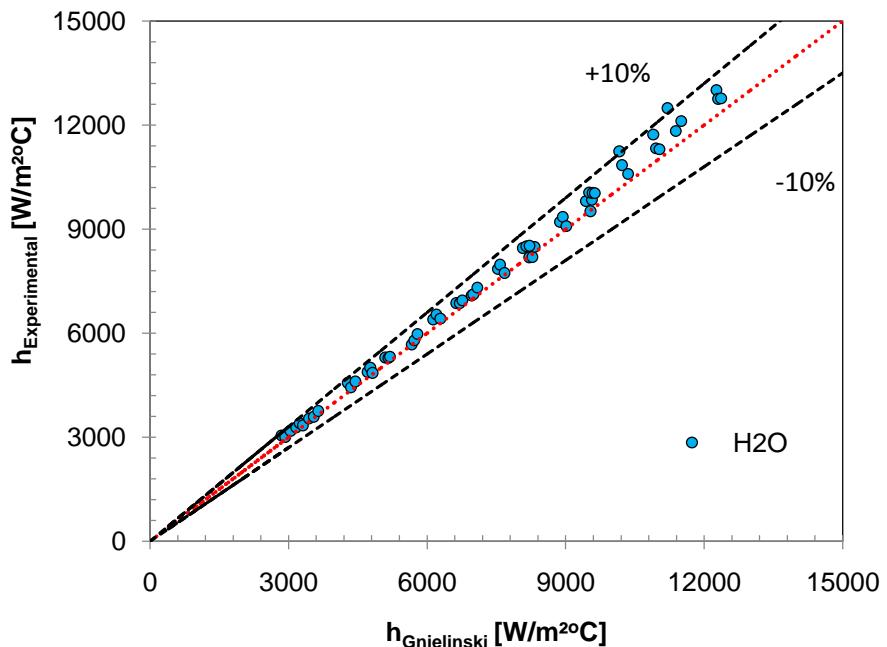


Figura 3.29 - Comparaçāo entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o obtido por meio do modelo de Gnielinski (1975).

Observa-se que existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e os teóricos. A maior diferença percentual entre os valores experimentais e os valores de Gnielinski foi de +10,2%, sendo que 85% das diferenças foram inferiores a +5%.

A correlaçāo de Dittus-Boelter apresentou um desvio maior em relaçāo aos resultados experimentais, ainda assim, o desvio de ±15% é considerado aceitável. A Figura 3.30 mostra a comparaçāo dos resultados.

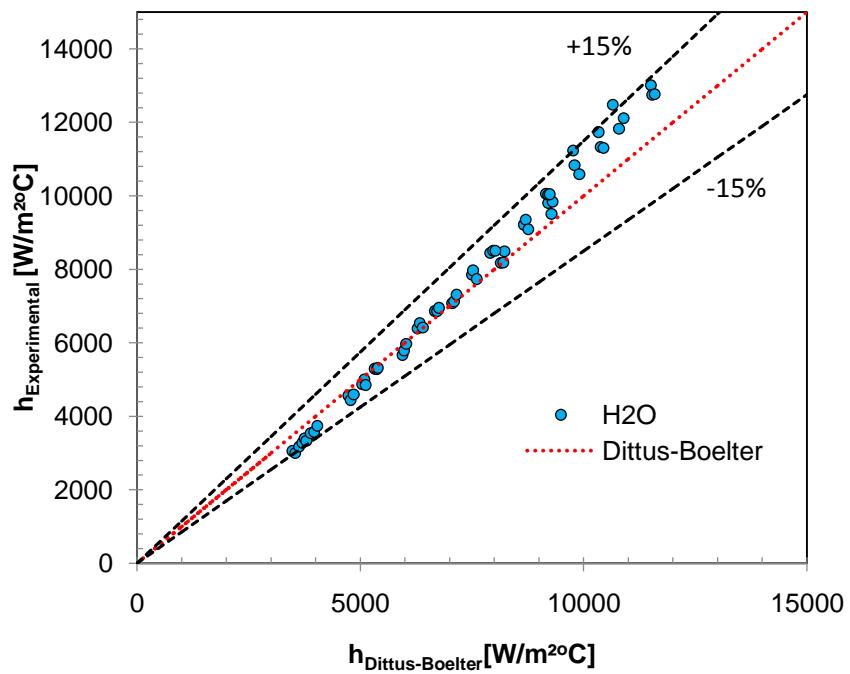


Figura 3.30 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor experimental e o obtido por meio do modelo de Dittus-Boelter (1930).

3.4.5. Conclusão da validação da bancada

Dos resultados, pode-se concluir que as condições adotadas para o estudo experimental são válidas. Além disso, comprovou-se que na bancada não existiam vazamentos e que o funcionamento dos sistemas de aquecimento e de refrigeração estavam operando adequadamente. Além disso, o isolamento da seção de testes e as resistências elétricas responsáveis pelo fluxo de calor cumpriram com o que foi estabelecido. Portanto, a bancada experimental estava apta para realização dos testes com nanofluido.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e comentados os resultados das propriedades termofísicas, do coeficiente convectivo de transferência de calor e da perda de carga para o nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.).

Para observar os possíveis incrementos, os resultados foram comparados com as propriedades termofísicas e hidráulicas do fluido base, que por sua vez, também foram determinadas experimentalmente.

O incremento das propriedades do nanofluido é calculado pela Eq. (4.1).

$$I[\%] = 100 \left(\frac{Y_{nf} - Y_{fb}}{Y_{fb}} \right) \quad (4.1)$$

Onde Y representa a propriedade que se deseja determinar.

O incremento médio é o resultado da média de todos os testes realizados.

4.1. Propriedades Termofísicas

Nesta seção, com exceção do calor específico que foi obtido teoricamente, serão apresentados os resultados experimentais das propriedades termofísicas do nanofluido. Os dados são apresentados em função da temperatura, pois como mostrado na revisão da

literatura, é o parâmetro indicado pela comunidade científica como o mais influente sobre a viscosidade e a condutividade térmica de nanofluidos.

Os dados experimentais referentes às propriedades termofísicas do fluido base foram comparados com os dados obtidos a partir do *SecCool*, um *software* gratuito desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade da Dinamarca, que contém bibliotecas com as propriedades termofísicas de diversos fluidos, incluindo o de misturas, como a da água com o etilenoglicol. As bibliotecas disponibilizam parâmetros experimentais que incluem dados da ASHRAE (do inglês, *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*), e de Ake Melinder, pesquisador do Departamento de Tecnologia em Energia da Suécia.

Além disso, será comentado o comportamento dos modelos teóricos para estimar as propriedades termofísicas do nanofluido. As propriedades termofísicas da nanopartícula de grafeno, necessárias para o cálculo teórico, foram disponibilizadas pelo fabricante, sendo a massa específica ($\rho_{np} = 2100 \text{ kg/m}^3$), o calor específico ($c_{p,np} = 0,710 \text{ kJ/kgK}$) e a condutividade térmica ($k_{np} = 5000 \text{ W/mK}$).

4.1.1. Massa específica

Os dados experimentais da massa específica do fluido base ($\text{H}_2\text{O:EG 70:30% vol.}$) apresentaram um desvio em relação aos dados de referência inferior a 0,6%, como ilustra a Fig. 4.1. Assim, o viscosímetro mostrou-se adequado para a medição da massa específica do nanofluido.

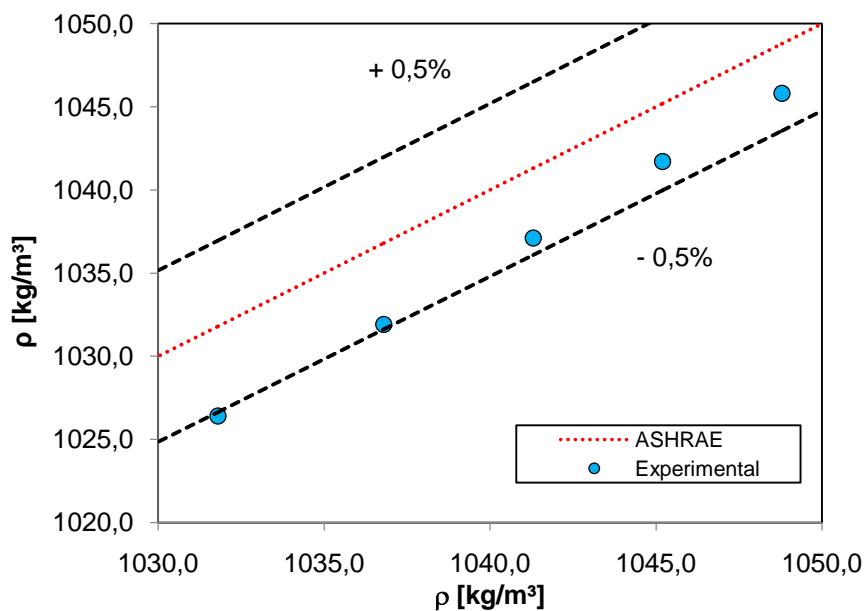


Figura 4.1 - Validação dos resultados experimentais para a massa específica do fluido base ($\text{H}_2\text{O:EG}$ 70:30% vol.).

Foram realizadas medições da massa específica para as três amostras do nanofluido em uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 50 °C com incrementos de 10°C. A Figura 4.2 mostra que a massa específica do nanofluido varia de acordo com a temperatura e com a concentração de grafeno.

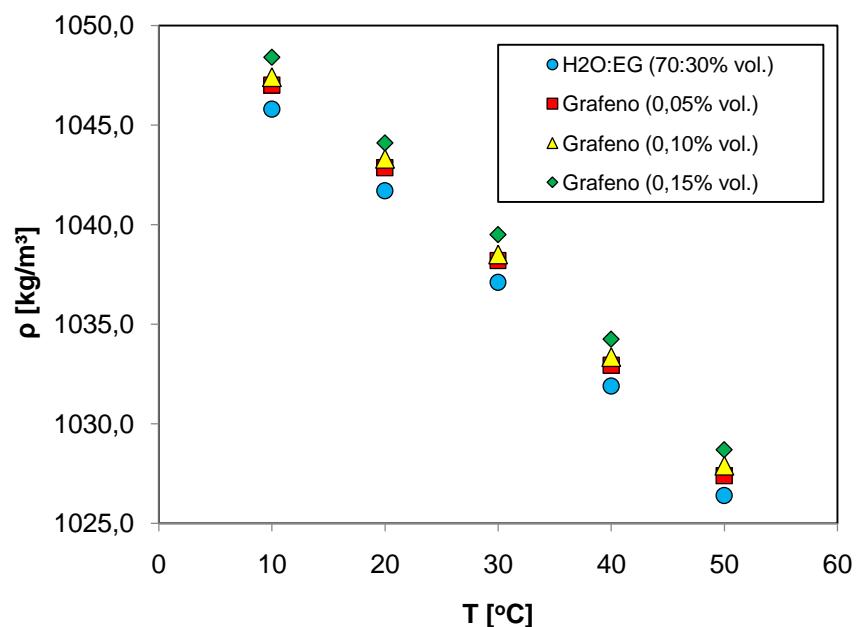


Figura 4.2 - Massa específica experimental do nanofluido de grafeno/ $\text{H}_2\text{O:EG}$ (70:30% vol.) em diferentes concentrações.

A correlação proposta por Pak e Cho (1998) mostrou que pode ser utilizada para determinar a massa específica do nanofluido em todas as concentrações, conforme demonstra a Tab. 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação entre a massa específica experimental e teórica do nanofluido para $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Concentração em volume [%]	0,05	0,10	0,15
Experimental	$1038,2 \pm 0,1$	$1038,5 \pm 0,1$	$1039,5 \pm 0,1$
Pak e Cho (1998)	1037,6	1038,2	1038,7

Para ilustrar de forma mais clara a boa concordância entre os resultados experimentais e os teóricos, a Fig. 4.3 apresenta os dados da massa específica para nanofluido com concentração em volume de 0,15%.

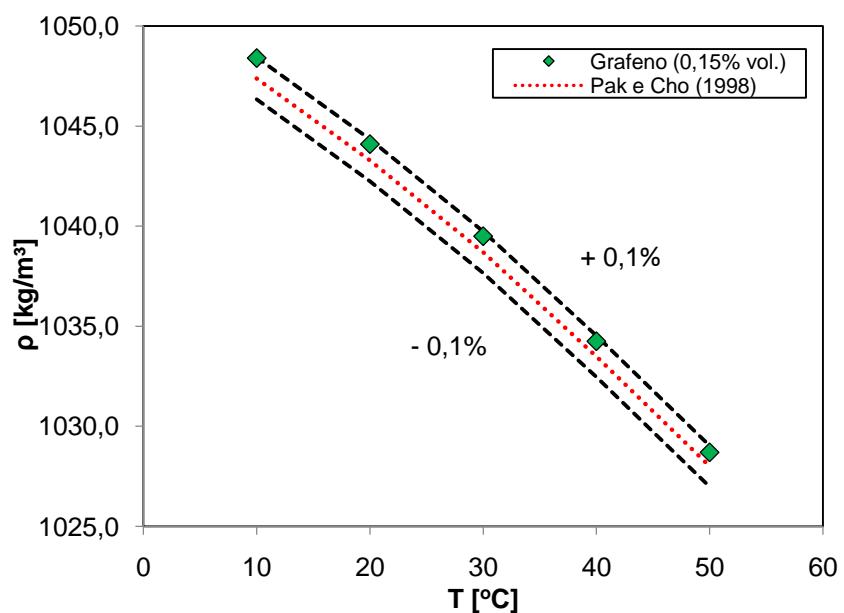


Figura 4.3 - Comparação entre a massa específica experimental e teórica do nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.) com concentração de 0,15% vol. de grafeno.

4.1.2. Calor específico

O calor específico das amostras de nanofluido foi estimado pela correlação teórica de Xuan e Roetzel (2000) baseada na suposição de equilíbrio térmico entre as partículas e o fluido, representada pela Eq. (2.4), pois de acordo com a revisão da literatura, foi o modelo mais utilizado, e segundo alguns autores, como Khanafer e Vafai (2011), Zhou *et al.* (2010) e O'Hanley *et al.* (2012), o modelo tem uma boa concordância com os resultados experimentais.

Os dados do calor específico do fluido base ($H_2O:EG$ 70:30% vol.) foram obtidos do software *SecCool*, da biblioteca ASHRAE.

A Figura 4.4 mostra a previsão teórica dos calores específicos obtidos pela Eq. (2.4) do nanofluido em função da temperatura para as três concentrações em volume de grafeno que foram analisadas (0,05; 0,10 e 0,15% vol.).

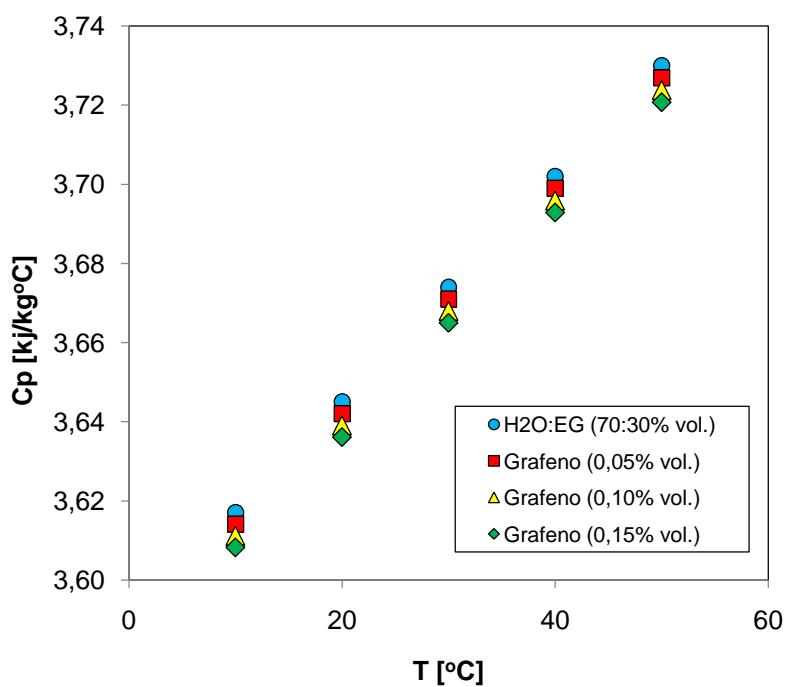


Figura 4.4 - Calor específico do nanofluido de grafeno/ $H_2O:EG$ (70:30% vol.) em diferentes concentrações.

Como se pode observar, o calor específico obtido pela Eq. (2.4) para todos os nanofluidos são mais baixos que o calor específico do fluido base, comportamento semelhante ao obtido por Cárdenas (2015) utilizando nanotubos de carbono dispersos em água. A redução do calor específico do nanofluido com o aumento da concentração de

nanofolhas de grafeno pode ser justificado, uma vez que, as nanopartículas apresentam calor específico inferior ao do fluido base.

4.1.3. Viscosidade dinâmica

O viscosímetro também mostrou que estava apto para determinar a viscosidade das amostras de nanofluido. A Figura 4.5 mostra que os valores experimentais da viscosidade do fluido base ($H_2O:EG$ 70:30% vol.) discordaram dos valores de referência com um desvio máximo de 2,3%.

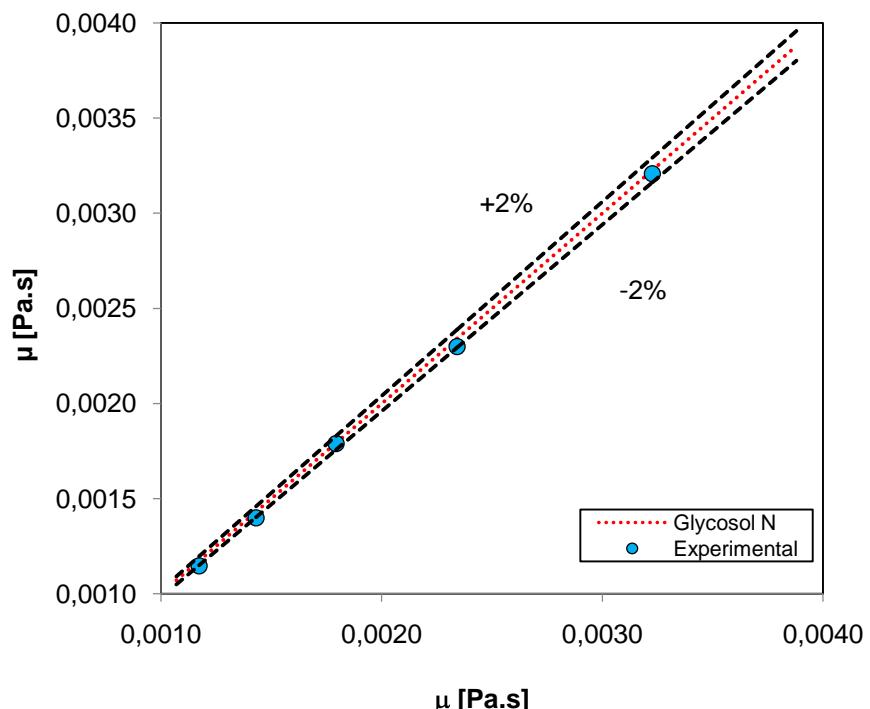


Figura 4.5 - Validação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica do fluido base ($H_2O:EG$ 70:30% vol.).

A Figura 4.6 apresenta os resultados da viscosidade para as amostras do nanofluido para três diferentes concentrações de grafeno (0,05; 0,10 e 0,15% vol.) analisadas.

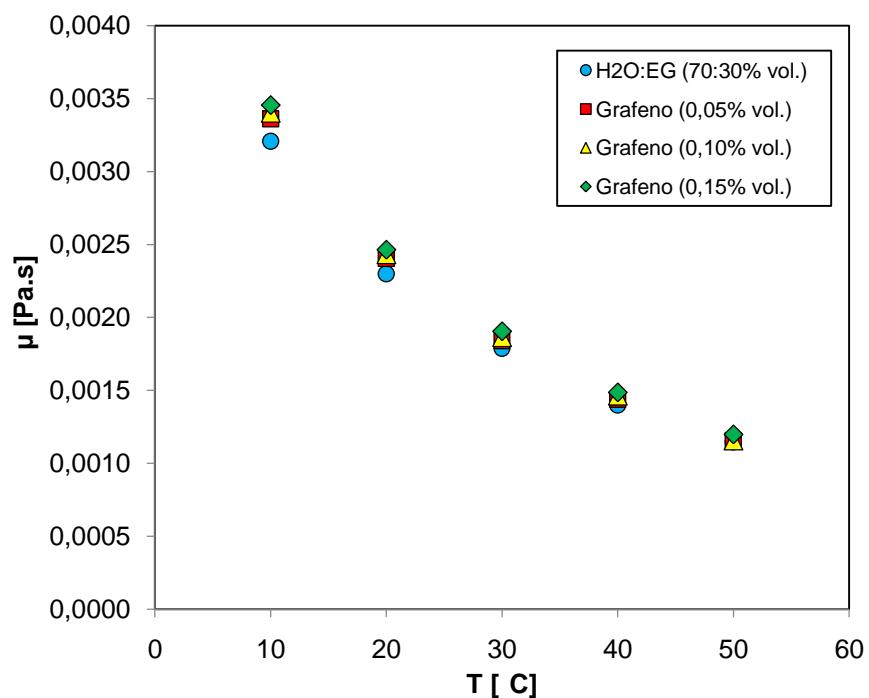


Figura 4.6 - Viscosidade experimental do nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.) em diferentes concentrações.

Como é possível observar, a viscosidade para todos os nanofluidos diminuem com o aumento da temperatura, seguindo o comportamento do fluido base. Com o aumento da temperatura, mais próximos se tornam os valores da viscosidade do nanofluido e do fluido base. O incremento médio foi de 3,0% para menor concentração (0,05% vol.), de 4,1% para concentração intermediária (0,10% vol.), e para máxima concentração (0,15% vol.), foi de 6,0%.

As correlações utilizadas para estimar a viscosidade do nanofluido mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais em todas as concentrações, conforme apresenta a Tab. 4.2. Os modelos de Einstein (1911), Brinkman (1952) e Batchelor (1977) apresentaram os mesmos resultados. O modelo de Wang, Xu e Choi (1999) apresentou maior proximidade dos resultados experimentais.

Tabela 4.2 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido para T=30 °C.

Concentração em volume [%]	0,05	0,10	0,15
Experimental	0,001841 ± 5e-6	0,001864 ± 7e-6	0,001905 ± 8e-6
Einstein (1911); Brinkman (1952); Batchelor (1977)	0,001791	0,001793	0,001795
Wang, Xu e Choi (1999)	0,001795	0,001802	0,001808

Vale destacar que as modificações sugeridas por Ghozatloo *et al.* (2015) nas equações que foram utilizadas não provocaram mudanças nos resultados.

Os modelos de Einstein (1911), Brinkman (1952) e Batchelor (1977) também foram utilizados por Zanjani *et. al* (2016) para comparar os resultados experimentais obtidos com nanofluido de grafeno/água em baixas concentrações em volume de grafeno (0,005, 0,01 e 0,02%). Os resultados apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais. Assim como nos resultados obtidos por eles, neste trabalho também foi possível observar que o desvio se tornava maior com o incremento da concentração de grafeno para todos os modelos. Para concentração de 0,05% o desvio médio utilizando o modelo de Wang, Xu e Choi (1999) foi de 2,7%, enquanto para 0,10% foi de 3,4% e para 0,15% de 5,0%.

A Figura 4.7 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos com o nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.) em função da temperatura para concentração em volume de grafeno de 0,15%.

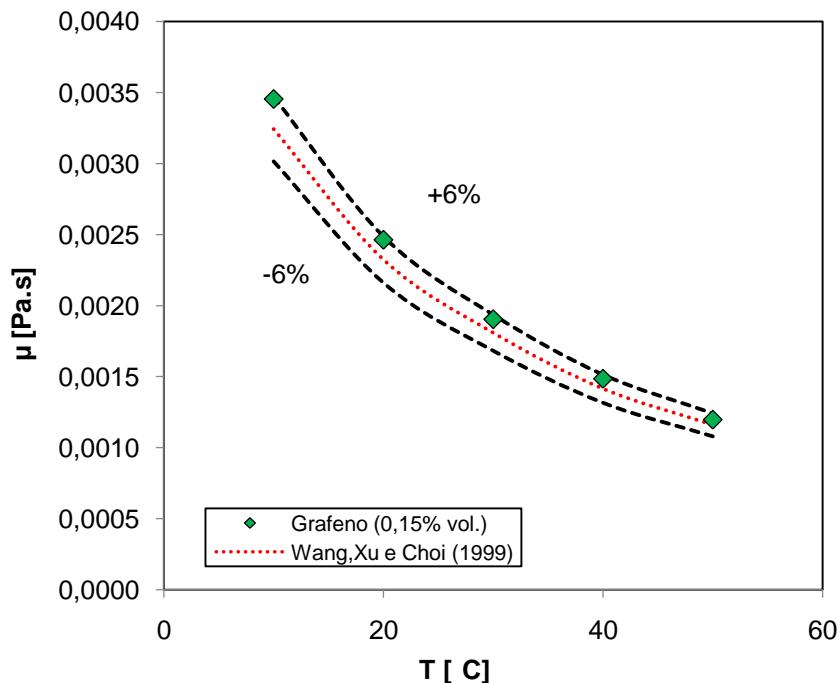


Figura 4.7 - Comparação entre a viscosidade dinâmica experimental e teórica do nanofluido com concentração de grafeno de 0,15% vol.

4.1.4. Condutividade Térmica

Foram realizadas medições da condutividade térmica para o fluido base ($\text{H}_2\text{O:EG}$ 70:30% vol.) em uma faixa de temperatura compreendida entre 10 e 40 °C com incrementos de 10°C. Os resultados apresentados é a média de dez testes de medição que são obtidos em cada faixa de temperatura.

O método transiente do fio quente (THB, do inglês *Transient Hot Wire*) mostrou que poderia ser utilizado para medição da condutividade térmica dos nanofluidos, uma vez que, os valores experimentais da condutividade térmica do fluido base discordaram dos valores de referência com um desvio médio de apenas 2,7%. A Figura 4.8 ilustra a comparação dos resultados.

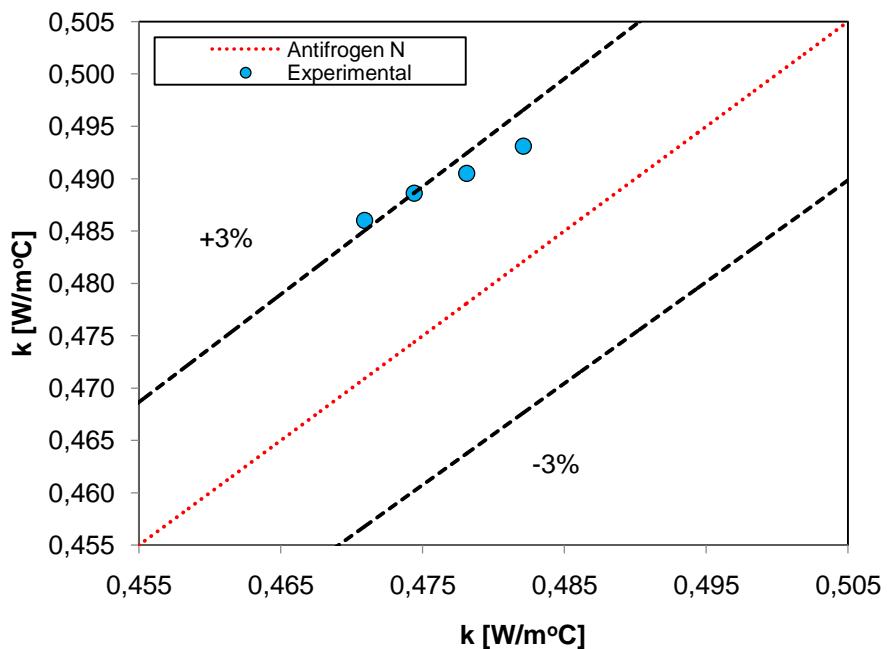


Figura 4.8 - Validação dos resultados experimentais para a condutividade térmica do fluido base ($\text{H}_2\text{O:EG 70:30% vol.}$).

A Figura 4.9 apresenta a variação da condutividade térmica para três diferentes concentrações de grafeno (0,05; 0,10 e 0,15% vol.) que foram adotadas para os nanofluidos.

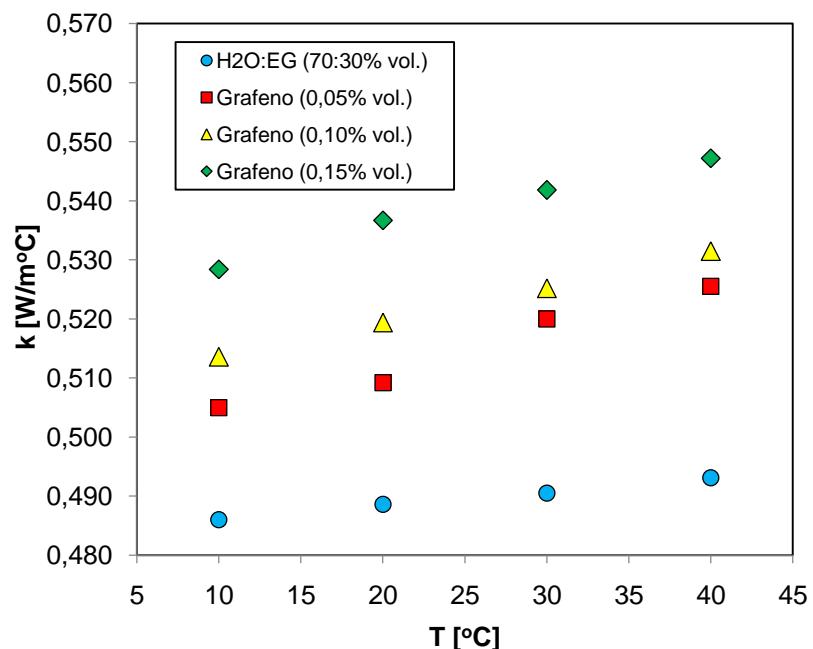


Figura 4.9 - Condutividade térmica do nanofluido de grafeno/ $\text{H}_2\text{O:EG (70:30% vol.)}$ em diferentes concentrações.

Observa-se que a condutividade térmica do nanofluido aumenta com o incremento da temperatura. Outra observação importante, é que a condutividade também aumenta com o incremento da concentração. De acordo com a teoria do movimento Browniano, estes dois parâmetros estão diretamente relacionados, pois à medida que a concentração em volume de grafeno aumenta maior se torna o movimento aleatório das nanopartículas provocando mais colisões entre elas; e estes efeitos são maiores em temperaturas mais elevadas, assim a condutividade térmica do nanofluido aumenta com a temperatura e com a concentração.

Para a temperatura de 30°C, quando comparado ao fluido base, o nanofluido com concentração em volume de grafeno de 0,15%, apresentou um incremento de 10,46%, enquanto para concentração em volume de grafeno de 0,10% o incremento foi de 7,07%, e para menor concentração foi de 6,01%. Uma comparação dos resultados do presente trabalho foi feita com os resultados obtidos por Ahammed *et al.* (2016), como ilustra a Fig. 4.10. Foi a comparação mais próxima encontrada até o momento, uma vez que, ele utilizou as mesmas concentrações de grafeno nas mesmas temperaturas, no entanto, o fluido base utilizado foi água destilada.

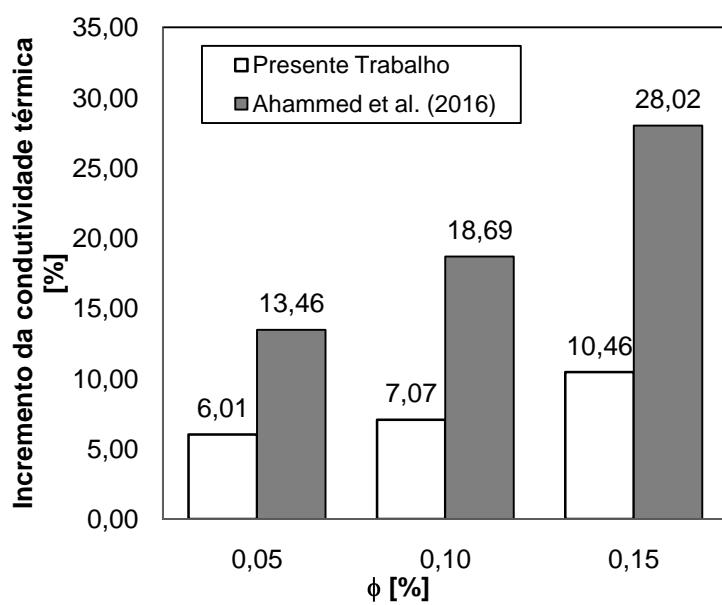


Figura 4.10 - Comparaçao do incremento da condutividade térmica entre o nanofluido do presente trabalho e o utilizado por Ahammed *et al.* (2016) para T=30°C.

O menor incremento do nanofluido do presente trabalho pode indicar a importância do fluido base na condutividade térmica, uma vez que, a viscosidade da mistura água etilenoglicol (70:30% vol.) é maior que a água, consequentemente, as nanopartículas encontram uma maior dificuldade para se movimentarem diminuindo o efeito do movimento Browniano.

Por sua vez, a Fig. 4.11 mostra a comparação entre os resultados para o nanofluido do presente trabalho e os obtidos por Ahammed *et al.* (2016) para a concentração em volume de grafeno de 0,10% em função da temperatura.

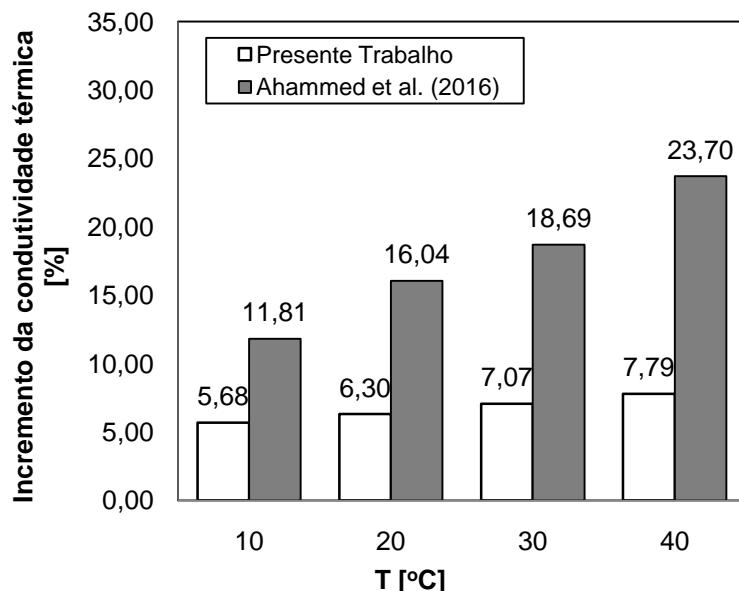


Figura 4.11 - Comparação do incremento da condutividade térmica entre o nanofluido do presente trabalho e o utilizado por Ahammed *et al.* (2016) para $\phi = 0,1\%$.

As correlações utilizadas para estimar a condutividade térmica do nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.) mostraram uma boa concordância com os resultados experimentais em todas as concentrações. Os resultados obtidos pelo modelo de Hamilton e Crosser (1962) foram muito próximos dos obtidos pelo modelo de Maxwell (1873). O desvio médio utilizando o modelo de Hamilton e Crosser (1962) foi de 4,7, 5,9 e 8,5% para concentração em volume de grafeno de 0,05, 0,10 e 0,15%, respectivamente. A Tabela 4.3 apresenta os resultados considerando a temperatura de 30 °C.

Tabela 4.3 - Comparação entre a condutividade térmica experimental e teórica do nanofluido para T=30 °C.

Concentração em volume [%]	0,05	0,10	0,15
Experimental	0,520 ± 0,007	0,525 ± 0,007	0,542 ± 0,007
Maxwell (1873)	0,491	0,492	0,493
Hamilton e Crosser (1962)	0,492	0,493	0,494

Observe que os valores experimentais foram maiores do que os valores teóricos. Este comportamento pode ser explicado devido a existência de outros mecanismos, como o movimento Browniano e a agregação das nanopartículas que podem incrementar a condutividade térmica do nanofluido e não são considerados pelos modelos clássicos. A Figura 4.12 apresenta de forma mais clara a comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos para a condutividade térmica do nanofluido em função da temperatura para concentração em volume de grafeno de 0,15%.

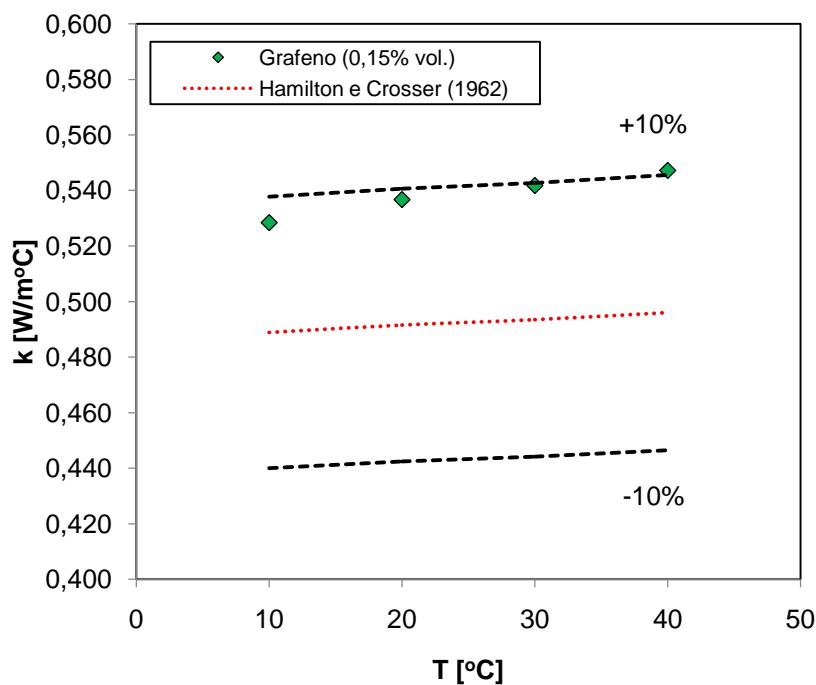


Figura 4.12 - Comparação entre a condutividade térmica experimental e teórica do nanofluido de grafeno/H₂O:EG (70:30% vol.) com concentração de 0,15% vol. de grafeno.

4.2. Avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos

Para investigar o comportamento termo-hidráulico do nanofluido foram utilizados além do fluido base ($H_2O:EG$ 70:30% vol.), as amostras de nanofluido que apresentaram maior condutividade térmica, ou seja, com concentração em volume de grafeno de 0,15% e 0,10% em condições de operação pré-estabelecidas. As amostras foram submetidas a três fluxos de calor ($q'' = 11, 16$ e 21 [kW/m^2]), em diferentes temperaturas ($T = 15, 20, 25$ [$^{\circ}C$]), com vazão mássica de 40-70 [g/s] com intervalos de 5 [g/s]. Assim, cada amostra foi submetida à 63 testes. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros que foram utilizados.

Tabela 4.4 - Parâmetros operacionais dos testes termo-hidráulicos com nanofluidos.

Amostra	T_{entrada} [$^{\circ}C$]	q'' [kW/m^2]	\dot{m} [g/s]
H ₂ O:EG (70:30% vol.)	15	11	40
			45
Grafeno (0,15% vol.)	20	16	50
Grafeno (0,10% vol.)	25	21	55
			60
			65
			70

Os nanofluidos geralmente apresentam um coeficiente de transferência de calor superior ao fluido base. No entanto, isto não indica obrigatoriamente que a utilização do nanofluido melhore o desempenho do sistema térmico, uma vez que, comumente, na literatura, a avaliação do coeficiente de transferência de calor do nanofluido em relação ao fluido base é realizada considerando o mesmo número de Reynolds. Mais recentemente, de acordo com alguns autores como Haghghi *et al.*, (2012) ; Kazi, Duffy e Chen (2014) e Sadeghinezhad *et al.*, (2014), comparar o coeficiente de transferência de calor na mesma velocidade de fluxo (potência de bombeamento) é considerado um método mais apropriado quando se trata de nanofluidos, pois comparar os coeficientes de transferência de calor para dois fluidos diferentes no mesmo número de Reynolds requer uma maior velocidade de fluxo para o fluido com viscosidade mais elevada. Assim, a maior transferência de calor no mesmo número de Reynolds pode não ser apenas devido ao desempenho do nanofluido, mas pode ser causado por uma maior taxa de fluxo aplicada sobre o nanofluido.

Por estas razões, os resultados do coeficiente de transferência de calor serão apresentados em função do número de Reynolds, Re , e também da velocidade mássica, G , representada pela Eq. (4.1), que se mostrou um parâmetro importante também para perda de carga.

$$G = \frac{4\dot{m}}{\pi D^2} \quad (4.2)$$

Onde (\dot{m}) é a vazão mássica e (D) o diâmetro interno da tubulação.

Para determinar o desempenho termo-hidráulico do nanofluido é necessário considerar a relação existente entre o coeficiente de transferência de calor por convecção e a potência de bombeamento. Os valores experimentais da potência de bombeamento utilizada na seção de testes foram obtidos pela Eq. (4.3), que considera a perda de carga, ΔP , medida na seção de testes para cada condição de vazão mássica (\dot{m}) .

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

Onde (ρ) é a massa específica da respectiva amostra em determinada condição de operação.

Assim, a avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos foi realizada pela relação existente entre a razão do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido e do fluido base, h_{nf}/h_{fb} , em função da razão da potência de bombeamento do nanofluido e do fluido base, $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$.

O desempenho termo-hidráulico esperado para o nanofluido é que a razão do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido e do fluido base, h_{nf}/h_f , seja maior que 1 e que a razão da potência de bombeamento do nanofluido e do fluido base, $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$, também seja maior que 1. O resultado considerado excelente e que determinaria o nanofluido como um futuro fluido de arrefecimento seria $h_{nf}/h_f > 1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb} = 1$, uma vez que, aumentaria o coeficiente de transferência de calor sem afetar a potência de bombeamento. A Tabela 4.5 resume as considerações adotadas para analisar o desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos.

Tabela 4.5 - Considerações para avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos.

Comportamento	Situação
Similar ao fluido base	$h_{nf}/h_{fb}=1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}=1$
Ótimo	$h_{nf}/h_{fb}>1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}=1$
Esperado	$h_{nf}/h_{fb}>1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}>1$
Insatisfatório	$h_{nf}/h_{fb}<1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}>1$

Assim, nesta seção serão apresentados os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, da perda de carga e do fator de atrito para as amostras avaliadas, e finalmente, será apresentada a avaliação do desempenho termo-hidráulico.

Os resultados são primeiramente apresentados para cada amostra de nanofluido, e posteriormente é estabelecida uma condição de operação para comparação entre eles. Será apresentado também a utilização de correlações para estimar o coeficiente de transferência de calor, a perda de carga e o fator de atrito das amostras avaliadas.

4.2.1. Amostra 1

A amostra 1 refere-se ao nanofluido com concentração em volume de nanopartículas grafeno de 0,15% dispersas no fluido base formado pela mistura entre a água e o etilenoglicol numa proporção de 70:30% em volume.

Coeficiente de transferência de calor por convecção

Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , referentes aos 63 testes realizados para a amostra 1 estão apresentados pela Fig. 4.13a em função da velocidade mássica, G , enquanto a Fig. 4.13b apresenta os mesmos resultados em função do número de Reynolds, Re .

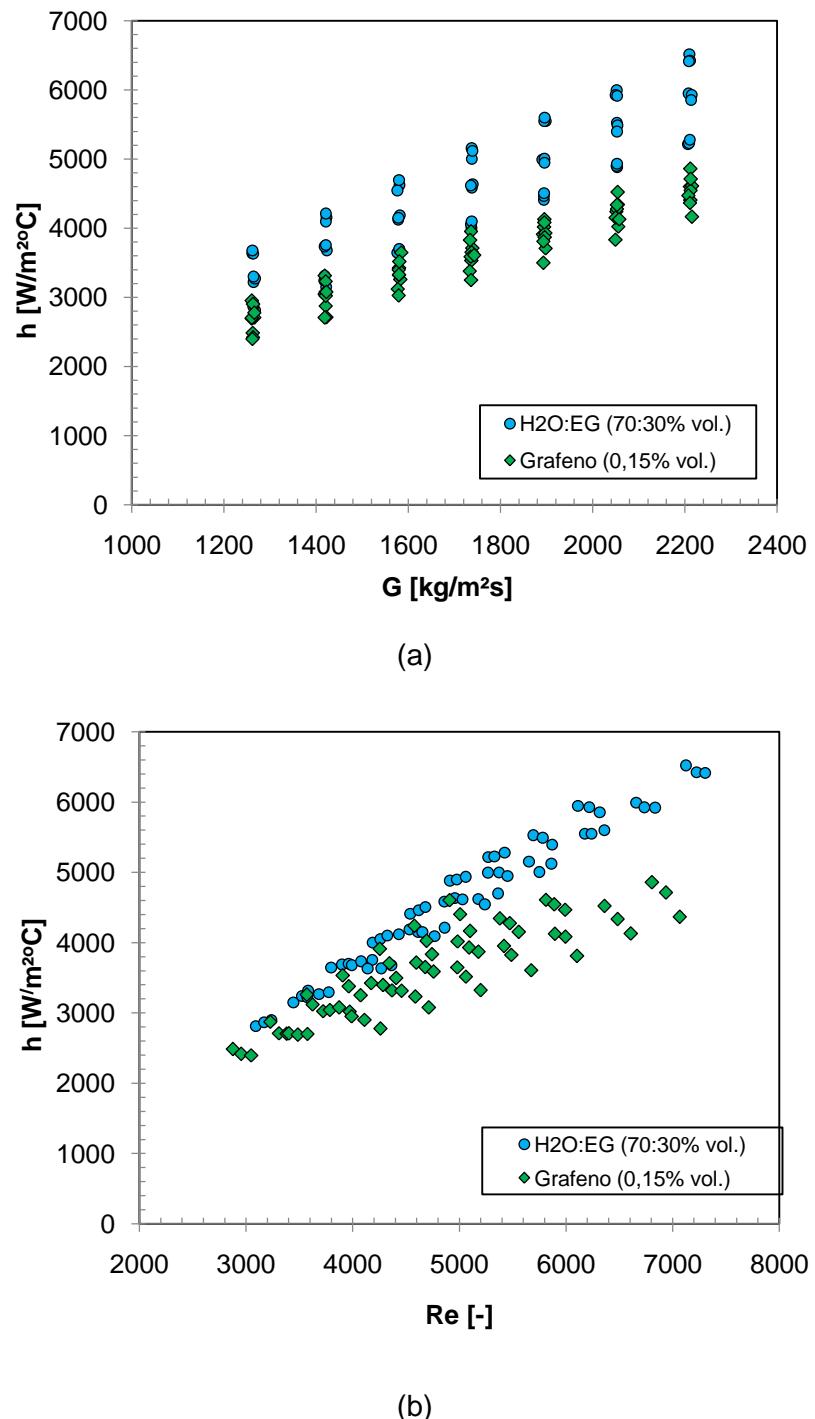
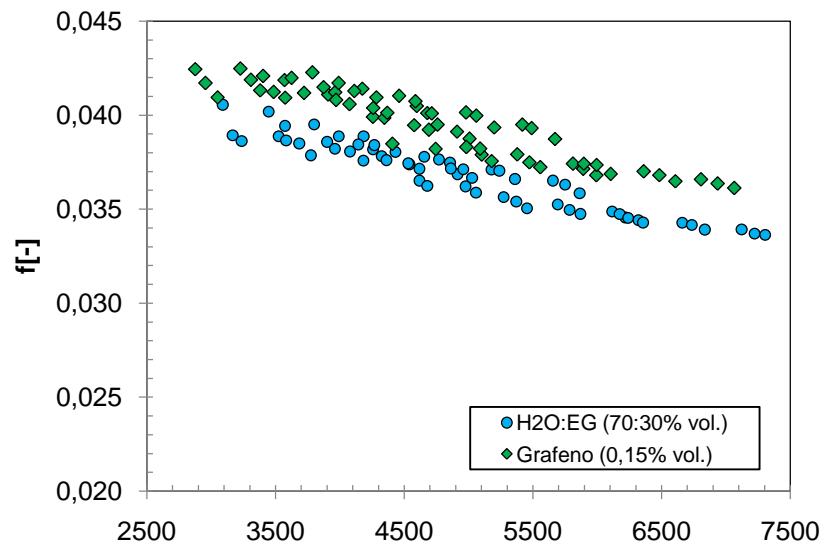


Figura 4.13 - resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido com $\phi = 0,15\%$ em função da: (a) G (b) Re .

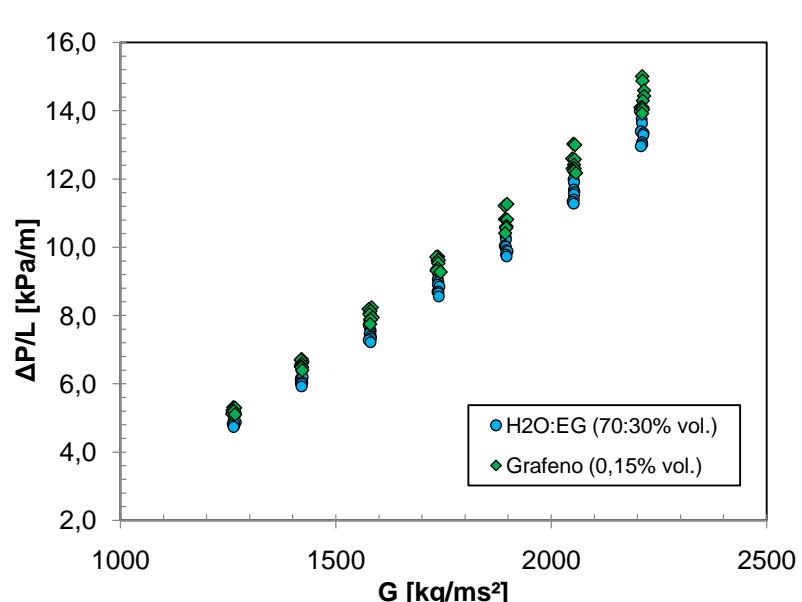
Independente do parâmetro e das condições operacionais utilizadas, o nanofluido apresentou uma redução no coeficiente de transferência de calor quando comparado ao fluido base. A redução média foi de 21,16% considerando a velocidade mássica, e de 20,0% considerando o número de Reynolds.

Perda de carga e fator de atrito

A Figura 4.14a apresenta os resultados obtidos para a amostra 1 em relação ao fator de atrito, f , em função do número de Reynolds, Re . A Figura 4.14b mostra os resultados referentes à perda de carga por unidade de comprimento, $\Delta P/L$, em função da velocidade mássica, G .



(a)



(b)

Figura 4.14 - Comparação entre os resultados experimentais do fluido base e do nanofluido com $\phi = 0,15\%$ para: (a) $f \times Re$. (b) $\Delta P/L \times G$.

O fator de atrito do nanofluido quando comparado com o obtido para o fluido base apresentou um incremento médio de 8,7%. Em relação à perda de carga o incremento médio foi de 7,7%.

Desempenho termo-hidráulico

O incremento do fator de atrito e da perda de carga observado para a amostra 1 em relação ao fluido base mostrou-se significativo. Como resultado, para o nanofluido avaliado, em todas as condições de operação, a razão encontrada foi $h_{nf}/h_{fb} < 1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb} > 1$. Deste modo, o nanofluido não apresentou vantagem, uma vez que, foi necessária uma maior potência de bombeamento para manter o nanofluido nas mesmas condições operacionais do fluido base sem obter incremento no coeficiente de transferência de calor.

A Figura 4.15 ilustra de maneira intuitiva os resultados da razão do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido e do fluido base, h_{nf}/h_{fb} , representados em função da razão da potência de bombeamento do nanofluido e do fluido base, $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$, demonstrando o comportamento termo-hidráulico do nanofluido.

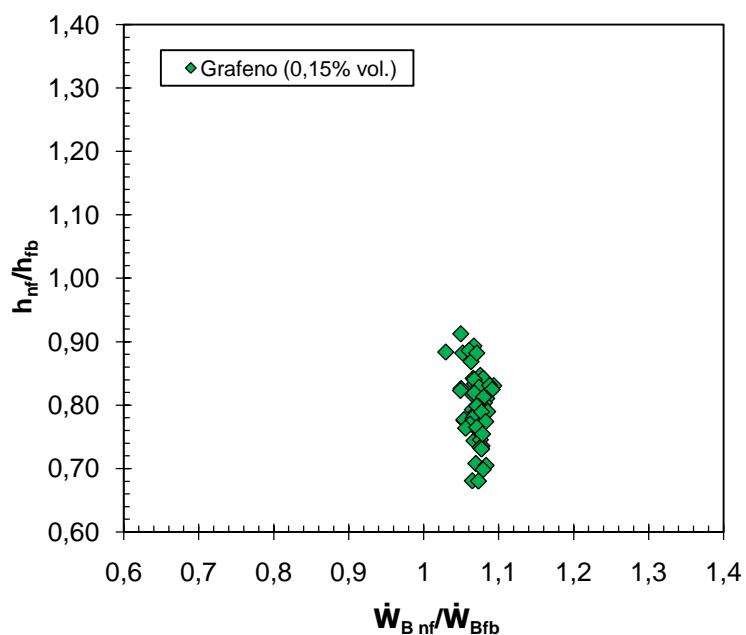


Figura 4.15 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para o nanofluido com $\phi=0,15\%$.

4.2.2. Amostra 2

A amostra 1 refere-se ao nanofluido com concentração em volume de nanopartículas grafeno de 0,10% dispersas no fluido base formado pela mistura entre a água e o etilenoglicol numa proporção de 70:30% em volume.

Coeficiente de transferência de calor por convecção

Os resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , referentes aos 63 testes realizados para a amostra 2 são apresentados pela Fig. 4.16a em função da velocidade mássica, G , enquanto a Fig. 4.16b apresenta os mesmos resultados em função do número de Reynolds, Re .

De modo semelhante à amostra 1 com concentração de 0,15%, independente do parâmetro e das condições operacionais utilizadas, a amostra 2 com concentração de 0,10% apresentou uma redução no coeficiente de transferência de calor quando comparado ao fluido base. A redução média foi de 28,53% considerando a velocidade mássica, e de 23,7% considerando o número de Reynolds.

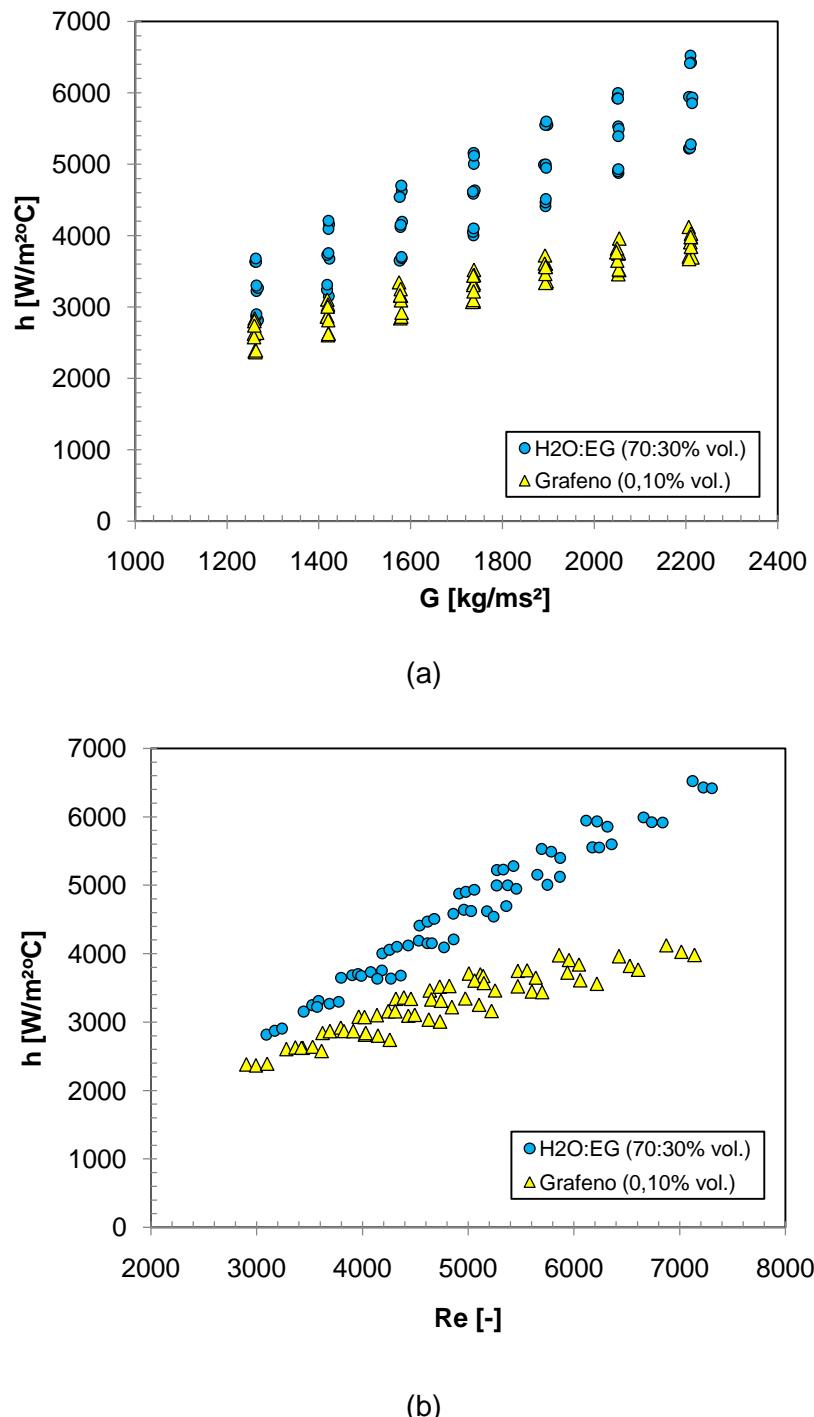


Figura 4.16 - Resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção para o nanofluido com $\phi = 0,10\%$ em função de: (a) G (b) Re .

Perda de carga e fator de atrito

As Figuras 4.17a e 4.17b apresentam os resultados obtidos para a amostra 2 em relação ao fator de atrito, f , e à perda de carga por unidade de comprimento, $\Delta P/L$,

respectivamente. O incremento médio foi de 12,7% para o fator de atrito e de 12,4% para a perda de carga em relação aos dados do fluido base.

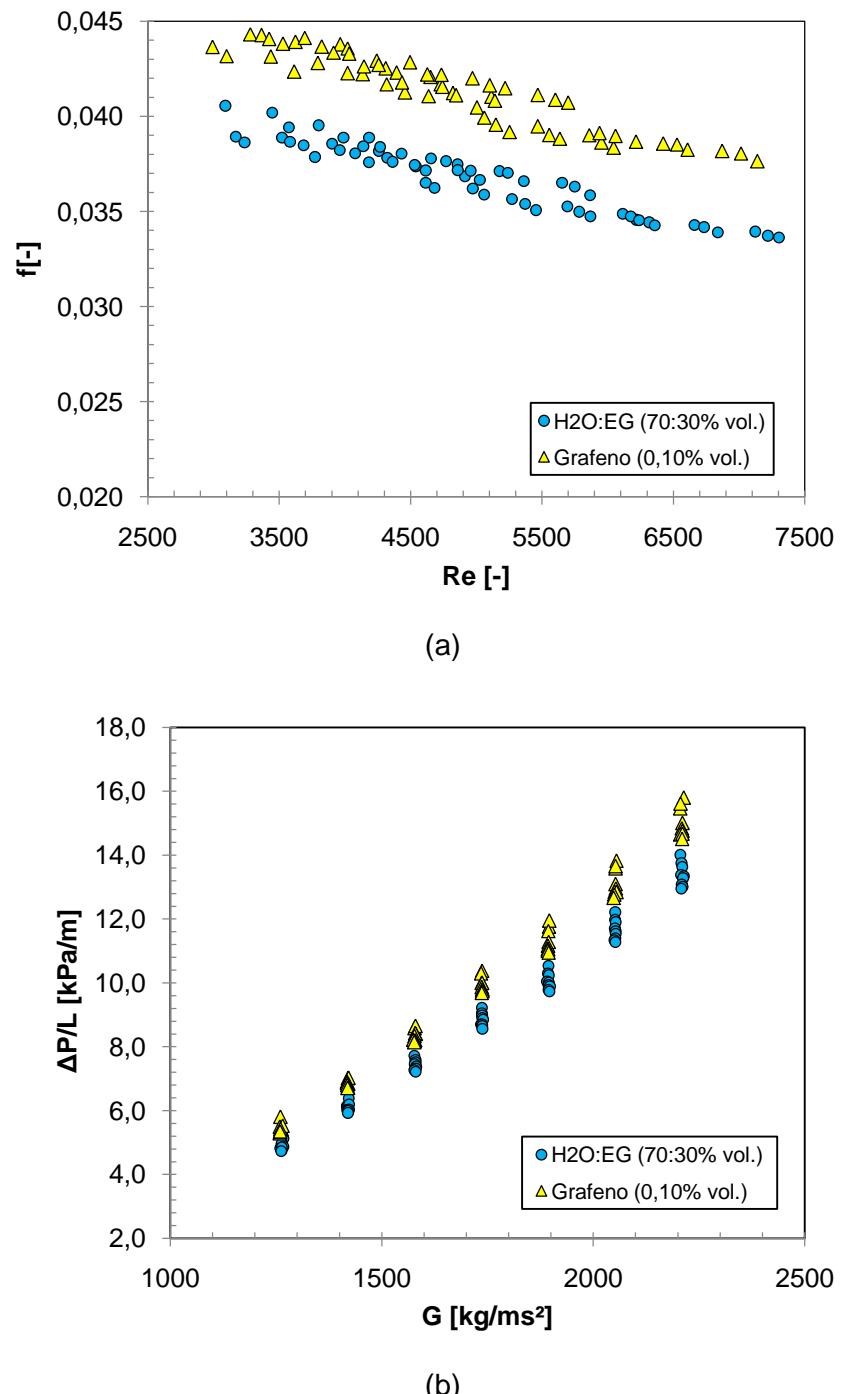


Figura 4.17 - Comparaç $\mathbf{\acute{a}}$ o entre os resultados experimentais do fluido base e do nanofluido com $\phi = 0,10\%$ para: (a) $f \times Re$. (b) $\Delta P/L \times G$.

Desempenho termo-hidráulico

O incremento do fator de atrito e da perda de carga observado para a amostra 2 em relação ao fluido base, assim como observado para a amostra 1, também foram significativas. Como resultado, para o nanofluido avaliado, em todas as condições de operação, a razão encontrada foi $h_{nf}/h_{fb} < 1$ e $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb} > 1$. Deste modo, o desempenho termo-hidráulico do nanofluido com concentração de 0,10% foi insatisfatório.

A Figura 4.18 mostra os resultados da razão do coeficiente de transferência de calor por convecção da amostra 2 e do fluido base, h_{nf}/h_{fb} , representados em função da razão da potência de bombeamento do nanofluido e do fluido base, $\dot{W}_{B,nf}/\dot{W}_{B,fb}$, demonstrando o comportamento termo-hidráulico do nanofluido.

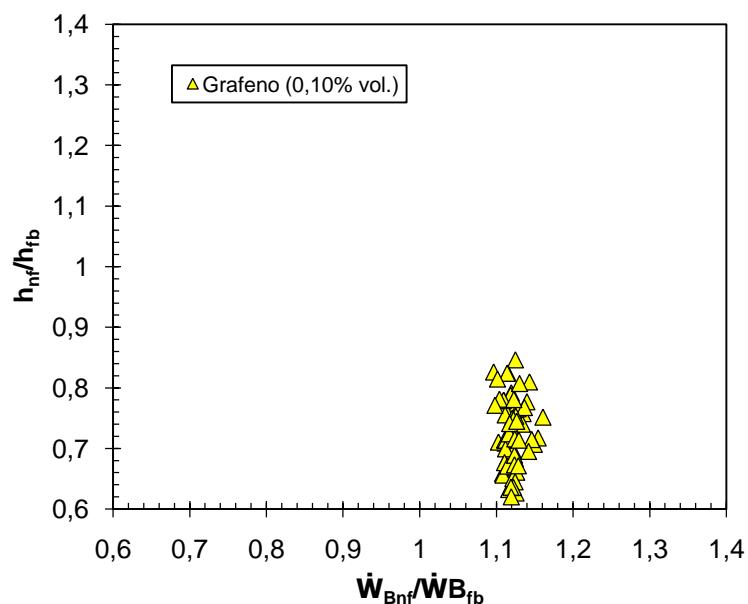


Figura 4.18 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para o nanofluido com $\phi=0,10\%$.

4.2.3. Avaliação do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos para determinada condição de operação.

Para realizar a comparação entre as amostras, foi estabelecida a condição de operação descrita pela Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Condição de operação para avaliação entre as amostras de nanofluido.

Amostra	$T_{\text{entrada}} [^{\circ}\text{C}]$	$q'' [\text{kW/m}^2]$	$\dot{m} [\text{g/s}]$
		40	
		45	
H2O:EG (70:30% vol.)		50	
Grafeno (0,15% vol.)	15	21	55
Grafeno (0,10% vol.)			60
			65
			70

Coeficiente de transferência de calor por convecção

A Figura 4.19 apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , das amostras de nanofluido e do fluido base, em função da velocidade mássica, G .

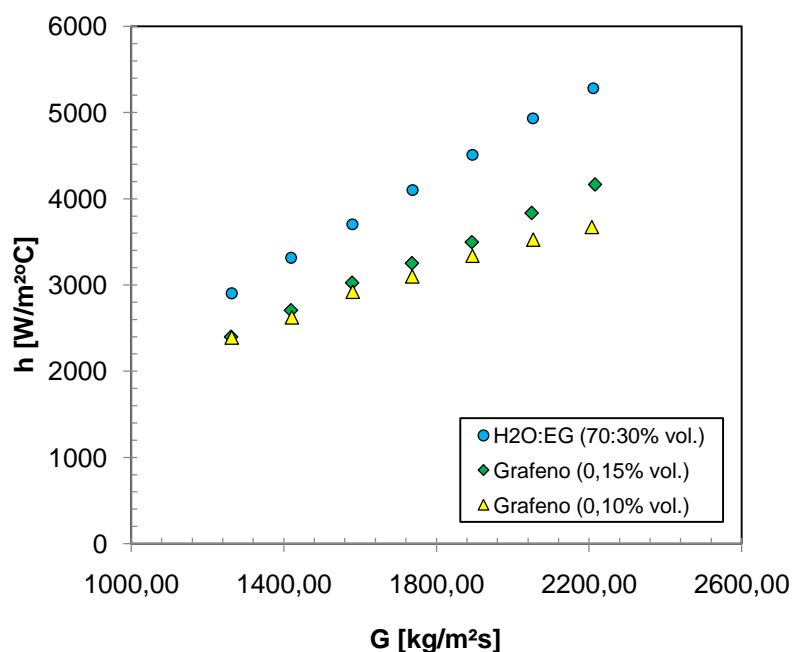


Figura 4.19 - Comparação entre o coeficiente de transferência de calor do fluido base e das amostras de nanofluido em função da velocidade mássica.

Nas condições adotadas, a redução média do coeficiente de transferência de calor em função da velocidade mássica para concentração em volume de grafeno de 0,15% foi de

20,4%, enquanto para concentração em volume de grafeno de 0,10%, a redução foi de 24,9%

A Figura 4.20 apresenta a comparação entre os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , das amostras de nanofluido e do fluido base, em função do número de Reynolds, Re .

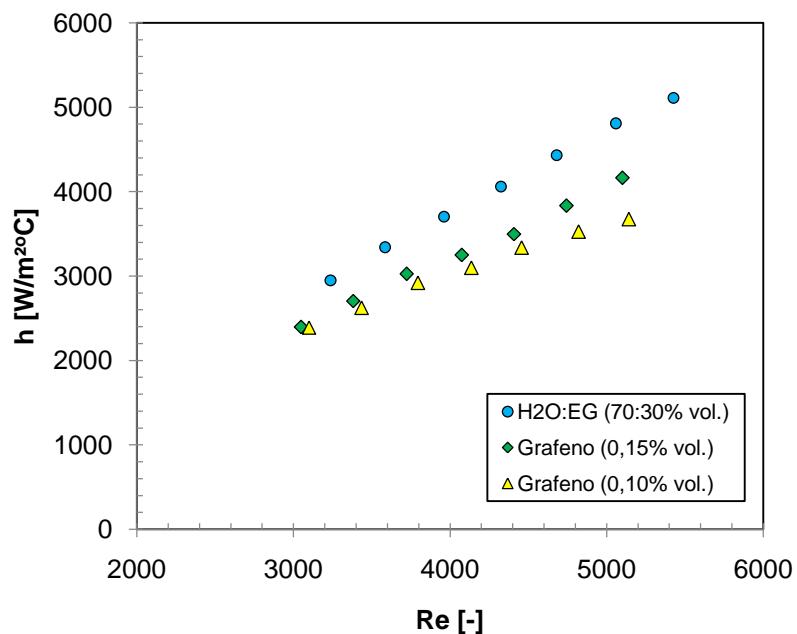


Figura 4.20 - Comparaçāo entre o coeficiente de transferência de calor do fluido base e das amostras de nanofluido em função do número de Reynolds.

A redução média do coeficiente de transferência de calor em função do número de Reynolds em volume de grafeno de 0,15% foi de 19,6%, enquanto para concentração em volume de grafeno de 0,10%, a redução foi de 21,8%.

Perda de carga e fator de atrito

A perda de carga das amostras de nanofluido, cujos resultados estão representados em função da velocidade mássica, G , na Fig. 4.21, foram superiores aos encontrados para o fluido base.

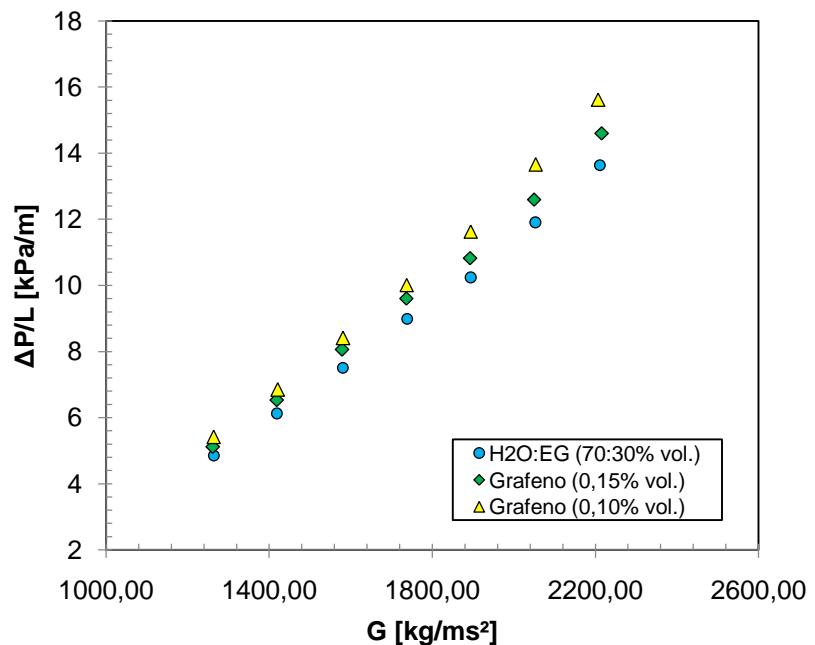


Figura 4.21 - Comparação entre a perda de carga do fluido base e das amostras de nanofluido em função da velocidade mássica.

Pode-se observar que a amostra com maior concentração, de forma inesperada, apresentou a menor perda de carga, uma vez que, como informa a literatura, quanto maior a concentração, maior a perda de carga. O incremento médio na perda de carga para a amostra de nanofluido com concentração de 0,15% foi de 6,5%, enquanto para concentração de 0,10% foi de 13,2%.

A justificativa mais provável é devido à sedimentação das nanopartículas na seção de testes. A amostra com concentração de 0,15% foi a primeira utilizada na bancada. Assim, quando a amostra com concentração de 0,10% foi utilizada, a perda de carga se tornou maior devido ao aumento do fator de atrito com a sedimentação das nanopartículas. A Figura 4.22 mostra a comparação do fator de atrito em função do número de Reynolds para as amostras de nanofluido e do fluido base.

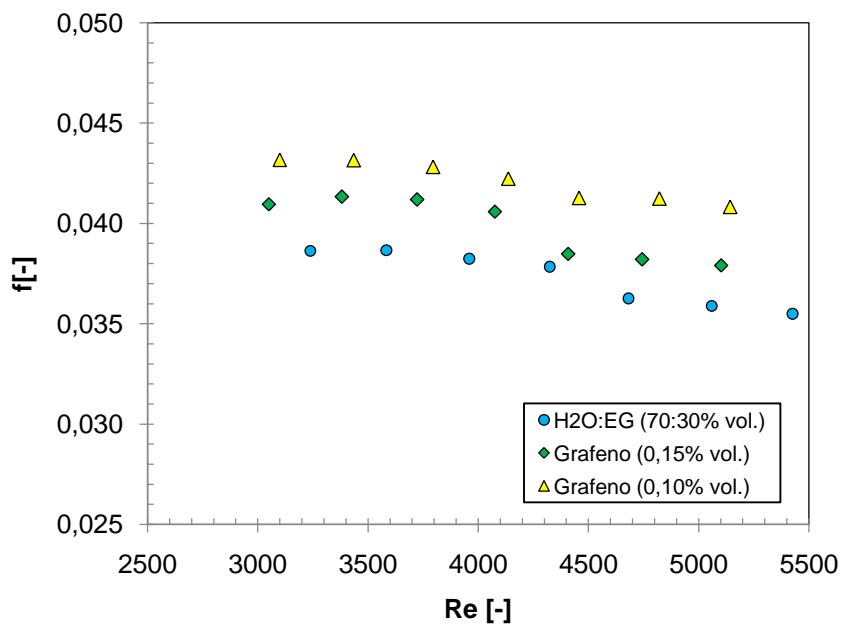


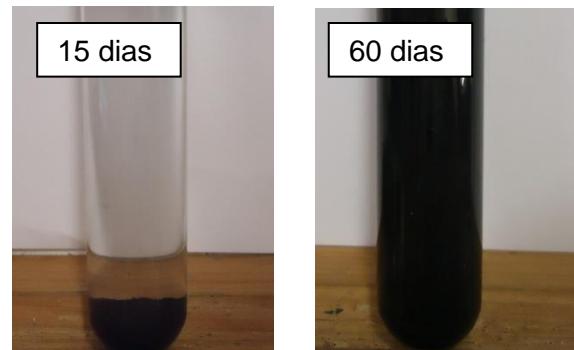
Figura 4.22 - Comparaçāo entre o fator de atrito do fluido base e das amostras de nanofluido em função do número de Reynolds.

A redução da concentração das amostras após os testes, conforme apresenta a Tab. 4.7, mostra que realmente ocorreu sedimentação das nanopartículas.

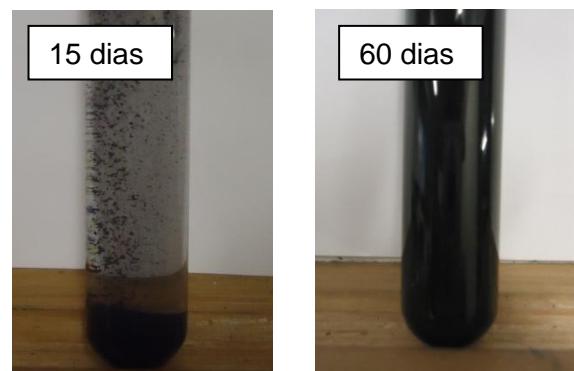
Tabela 4.7 - Concentração das amostras de nanofluido após os testes termo-hidráulicos.

Amostra	ϕ [%] (inicial)	ϕ [%] (após testes)	Redução (%)
1	0,153	0,128	16,6
2	0,104	0,082	21,4

A sedimentação das nanopartículas pode ser justificada pela degradação das amostras quando submetidas às diversas condições de operação, uma vez que, as amostras que foram separadas para análise de sedimentação após a produção, mesmo após 60 dias, ainda apresentavam uma boa estabilidade. Já as amostras que foram coletadas após a realização dos testes termo-hidráulicos, em apenas 15 dias apresentaram elevada sedimentação, conforme ilustra a Fig. 4.23.



(a)



(b)

Figura 4.23 - Imagens dos nanofluidos quando submetidos aos testes termo-hidráulicos, à esquerda, e sem submeter-se aos testes, à direita. (a) $\phi = 0,15\%$. (b) $\phi = 0,10\%$.

Desempenho termo-hidráulico

Como já foi apresentado, as amostras de nanofluido apresentaram um desempenho termo-hidráulico insatisfatório. Pode-se observar pela Fig. 4.24 que a perda de carga foi um parâmetro importante no pior desempenho da amostra 2.

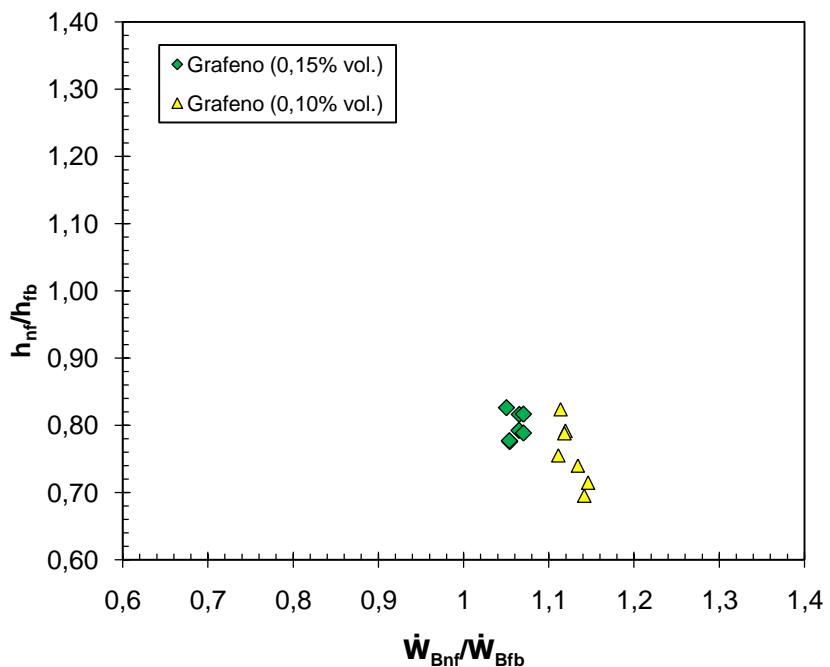


Figura 4.24 - Resultados experimentais do desempenho termo-hidráulico para os nanofluidos com $\phi=0,15\%$ e $\phi=0,10\%$.

4.2.4. Comparação dos resultados termo-hidráulicos com correlações

Coeficiente de transferência de calor por convecção

A correlação de Gnielinski (1975), conforme foi apresentada pela Eq. (3.31) mostrou que consegue estimar o coeficiente de transferência de calor por convecção para o fluido base ($\text{H}_2\text{O:EG } 70:30\%$ vol.) com uma margem de erro de $\pm 10\%$, o que é notável para escoamentos de transição. Por outro lado, o erro de $\pm 30\%$ para a amostra 1 (Grafeno 0,15% vol.) e o erro de $\pm 35\%$ para a amostra 2 (Grafeno 0,10% vol.) não representa de forma satisfatória a estimativa do coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos através da correlação de Gnielinski (1975). A Figura 4.25 ilustra a comparação desses resultados, que inclui todos os 63 testes que foram realizados para cada amostra.

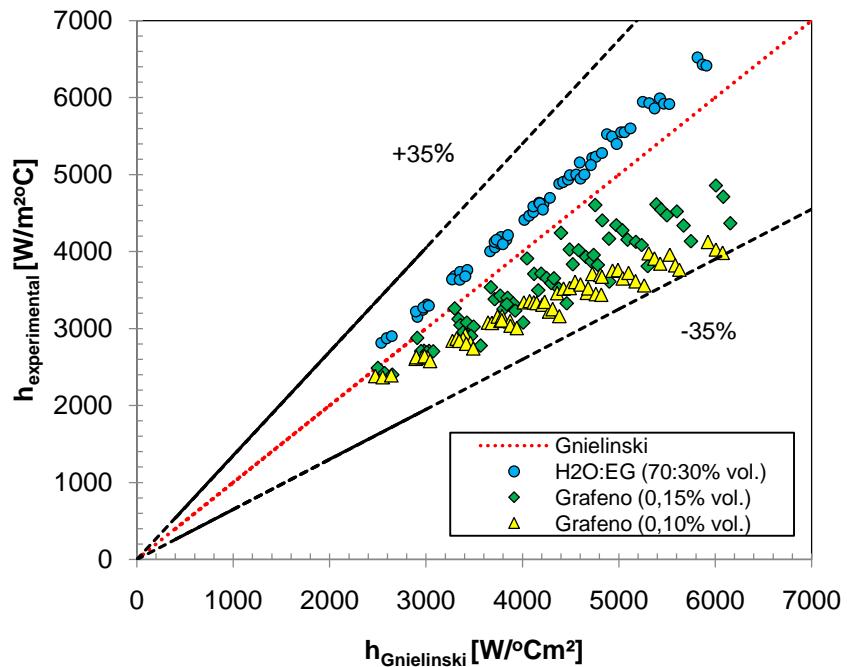


Figura 4.25 - Comparaçāo do coeficiente de transferêncā de calor obtido através da correlaçāo de Gnielinski (1975) com os resultados experimentais.

Fator de atrito e perda de carga

As correlaçāes de Petukhov (1970), apresentada pela Eq. (3.21), e de Blasius, apresentada pela Eq. (3.22), utilizadas para estimar o fator de atrito das amostras avaliadas concordaram muito bem com os resultados experimentais. A margem de erro foi de $\pm 10\%$ para ambos os modelos. Considerando o regime de transiçāo, o desvio de apenas $\pm 10\%$ é considerado ótimo. A Figura 4.26 apresenta a comparaçāo desses resultados com os dados experimentais do fator de atrito obtidos para os 63 testes que foram realizados para cada amostra em função do número de Reynolds.

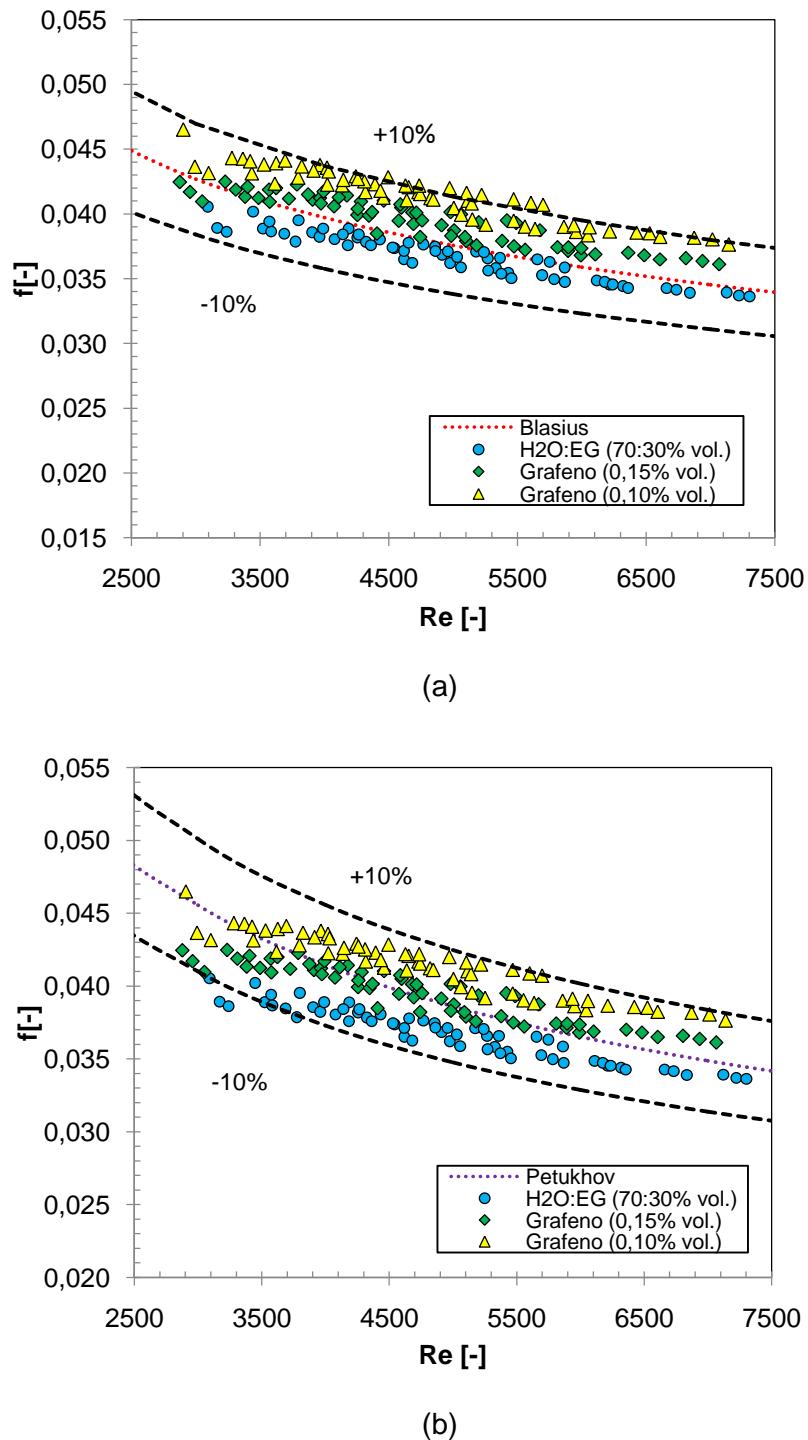
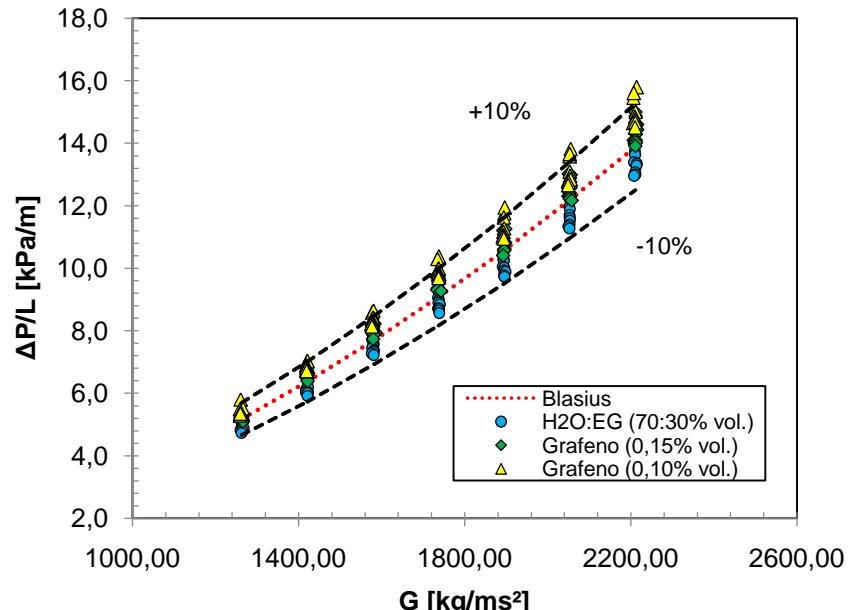


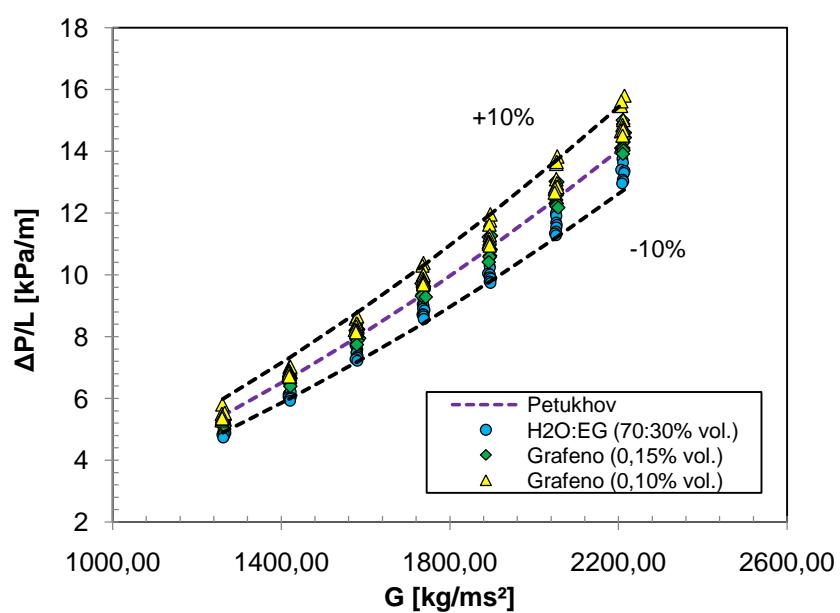
Figura 4.26 - Comparação entre o fator de atrito experimental e teórico obtido pelas correlações: (a) Blasius e (b) Petukhov (1970).

De forma semelhante, quando o fator de atrito obtido pelo modelo Petukhov (1970) ou pelo modelo de Blasius são utilizados para encontrar a perda de carga teórica, os resultados também são satisfatórios, a margem de erro foi de $\pm 10\%$ em comparação com os resultados

experimentais. A comparação da perda de carga experimental encontrada para cada amostra proveniente do total de 63 testes com os resultados teóricos está apresentada em função da velocidade mássica, G , pela Fig. 4.27a considerando o modelo de Blasius, e pela Fig. 4.27b considerando o modelo de Petukhov (1970).



(a)



(b)

Figura 4.27 - Comparação entre a perda de carga experimental e teórica obtida com o auxílio das correlações: (a) Blasius e (b) Petukhov (1970).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com o intuito de encontrar um novo tipo de fluido que consiga melhorar a eficiência dos processos de troca térmica, este trabalho propôs o estudo do desempenho termo-hidráulico do nanofluido formado por nanopartículas de grafeno dispersas em uma mistura de água e etilenoglicol numa proporção de 70:30% em volume.

As etapas necessárias para uma avaliação completa do desempenho termo-hidráulico do nanofluido foram todas realizadas, sendo elas: a etapa de produção pelo método de dois passos, medição das propriedades termofísicas (massa específica, viscosidade dinâmica e condutividade térmica) e utilização em uma bancada experimental da qual foi possível retirar informações para determinar o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga.

5.1. Conclusões

O método de dois passos com o auxílio do homogeneizador por alta pressão mostrou-se um método eficiente para produção dos nanofluidos baseados em nanopartículas de grafeno dispersas em uma mistura de água e etilenoglicol numa proporção de 70:30% em volume, pois mesmo após um período de 60 dias, as amostras produzidas ainda apresentavam boa estabilidade.

Como era esperado, os resultados mostraram que mesmo em baixas concentrações, os nanofluidos de grafeno apresentaram uma condutividade térmica superior à da mistura água e etilenoglicol (70:30% vol.). Verificou-se ainda o incremento da condutividade térmica dos nanofluidos com o aumento da concentração de nanopartículas de grafeno e da temperatura. O incremento foi de 6,01% para amostra com $\phi=0,05\%$, de 7,07% para $\phi=0,10\%$ e de 10,46% para $\phi=0,15\%$ considerando $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. O incremento com a

temperatura foi de 5,68; 6,30; 7,07 e 7,79% para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C, respectivamente.

A viscosidade dinâmica sofreu pequenos incrementos com a concentração. Considerando a temperatura de 30°C, o incremento foi de 3,0% para amostra com $\phi=0,05\%$, de 4,1% para $\phi=0,10\%$ e de 6,0% para $\phi=0,15\%$.

Os modelos teóricos utilizados para estimar a massa específica, a viscosidade dinâmica e a condutividade térmica apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais.

A perda de carga dos nanofluidos de grafeno foi superior ao do fluido base. Para a amostra com $\phi =0,15\%$ foi o incremento foi de 6,5%, enquanto para amostra com $\phi = 0,10\%$ foi de 13,2%. A deposição de partículas na seção de testes é a causa mais provável para a amostra de menor concentração apresentar maior perda de carga, uma vez que, a amostra de menor concentração foi utilizada após a concentração de 0,15%. Pois, como observado, os nanofluidos são suscetíveis a sofrer degradação. Após os testes termo-hidráulicos, quando os nanofluidos foram submetidos a diversas condições de temperatura, fluxo de calor e escoamento, a sedimentação foi extremamente acelerada. Em apenas 15 dias as nanopartículas de grafeno sedimentaram quase que completamente.

Os modelos de Petukhov (1970) e de Blasius mostraram que podem ser utilizados para obter o fator de atrito dos nanofluidos. O desvio para ambos os modelos em relação aos resultados experimentais foi de apenas $\pm 10\%$, o que é notável considerando o regime de transição.

Utilizando as condições operacionais que foram estabelecidas, não foi observada nenhuma vantagem termo-hidráulica para os nanofluidos quando comparados ao fluido base.

Embora o aumento da condutividade térmica aliado ao baixo incremento da viscosidade dinâmica indicasse uma possível melhora no desempenho de transferência de calor dos nanofluidos, o desempenho termo-hidráulico foi insatisfatório para as duas amostras de $\phi=0,15\%$ e de $\phi=0,10\%$ que foram escolhidas para serem utilizadas nos testes por apresentarem maior condutividade térmica. A degradação dos nanofluidos devido à sedimentação das nanopartículas é a causa mais provável para o desempenho termo-hidráulico insatisfatório das amostras avaliadas.

Independente do parâmetro que foi utilizado para avaliar o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos, ou seja, em função do mesmo número de Reynolds ou em relação à mesma velocidade mássica, houve redução quando comparado ao fluido

base. Em média, para a amostra com $\phi=0,15\%$ a redução foi de 21% e para a amostra com $\phi=0,10\%$ a redução foi de 26%.

O modelo de Gnielinski (1975) conseguiu estimar com boa precisão o coeficiente de transferência de calor por convecção para a água e para o fluido base ($H_2O:EG$ 70:30% vol.) com margem de erro de $\pm 10\%$. Porém, para os nanofluidos, o desvio é de cerca de $\pm 30\%$ para $\phi = 0,15\%$ e de $\pm 35\%$ para a $\phi = 0,10\%$.

Assim, apesar do desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos ter sido insatisfatória, pode-se concluir que os objetivos gerais da proposta do trabalho foram atendidos, pois a presente pesquisa se insere no esforço para o entendimento do comportamento dos nanofluidos que ainda tem se mostrado contraditórias.

5.2. Sugestões

Em relação à etapa de produção, sugere-se utilizar nanopartículas em pó para produção dos nanofluidos, ao invés das soluções, de tal modo que seja possível afirmar com mais clareza o comportamento termo-hidráulico do nanofluido, sem interferência de surfactantes ou outros compostos que possam dificultar ou prejudicar as análises.

Em relação à limpeza da bancada, sugere-se utilizar água destilada circulando por um período igual ou superior à 1 dia com temperatura em torno de 50°C, para garantir e melhorar a remoção de possíveis partículas que sedimentarem.

Em relação à degradação da amostra, recomenda-se avaliar outros parâmetros como o pH e o surfactante, que possam reduzir a sedimentação das nanopartículas.

A sequência de testes interfere nos resultados, deste modo é recomendado começar os testes com as amostras de menor concentração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WEB OF SCIENCE. Disponível em: <apps.webofknowledge.com>. Acesso em: Dezembro 2015.

ABARESHI, M. et al. Fabrication, characterization, and measurement of viscosity of α -Fe₂O₃-glycerol nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, v. 163, p. 27–32, 2011. ISSN 0167-7322.

AGARWAL, D. K.; VAIDYANATHAN, A.; KUMAR, S. S. Experimental investigation on thermal performance of kerosene–graphene nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 71, p. 126 - 137, 2016. ISSN 0894-1777.

AGARWAL, D. K.; VAIDYANATHANB, 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.

AHAMMED, N. et al. Measurement of thermal conductivity of graphene–water nanofluid at below and above ambient temperatures. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 70, p. 66 - 74, 2016. ISSN 0735-1933.

ALEGRIAS, J. G. P. **Avaliação Experimental da Transferência de calor e Perda de Pressão de Nanofluidos de Prata no Interior de Tubos Horizontias**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 161 f. 2014.

ALI, M.; ZEITOUN, O.; ALMOTAIRI, S. Natural convection heat transfer inside vertical circular enclosure filled with water-based Al₂O₃ nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 63, p. 115-124, 2013. ISSN 1290-0729.

ARZANI, H. K. et al. Experimental and numerical investigation of thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of covalent and noncovalent functionalized graphene nanoplatelet-based water nanofluids in an annular heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 68, p. 267-275, 2015. ISSN 0735-1933.

ASHRAE. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. handbook fundamentals.** Atlanta: [s.n.], 1985.

BABU, S. R.; BABU, P. R.; RAMBABU, V. Effects of Some Parameters on Thermal Conductivity of Nanofluids and Mechanisms of Heat Transfer Improvement. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 3, n. 4, p. 2136-2140, 2013. ISSN 2248-9622.

BABY, T. T.; RAMAPRABHU, S. Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 289, 2011.

BABY, T. T.; SUNDARA, R. Synthesis and Transport Properties of Metal Oxide Decorated Graphene Dispersed Nanofluids. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 115, n.17, p. 8527–8533, 2011a.

BABY, T. T.; SUNDARA, R. Synthesis and nanofluid application of silver nanoparticles decorated graphene. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, n. 26, p. 9702-9709, 2011b.

BALANDIN, A. A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon. **Nature Materials**, v. 10, p. 569-581, 2011.

BALANDIN, A. A. et al. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. **Nano Letters**, v. 8, n. 3, p. 902 - 907, 2008.

BASHIRNEZHAD, K. et al. Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 73, p. 114–123, 2016. ISSN 0735-1933.

BATCHELOR, G. K. Effect of Brownian-motion on bulk stress in a suspension of spherical-particles. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 83, n. 1, p. 97–117, 1977.

BECK, M. P.; SUN, T. F.; TEJA, A. S. The thermal conductivity of alumina nanoparticles dispersed in ethylene glycol. **Fluid Phase Equilibria**, v. 260, p. 275- 278, 2007. ISSN ISSN 0378-3812.

BEHI, M.; MIRMOHAMMADI, S. A. **Investigation on Thermal Conductivity, Viscosity and Stability of Nanofluids.** Dissertação de Mestrado - Royal Institute of Technology. Stockholm, p. 143 f. 2012.

BRINKMAN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The journal of Chemical Physics**, v. 20, p. 571-573, 1952.

BROWN, R. A Brief Account of the Microscopical Observations made in the months of June and July of 1827, on the particles contained in the Pollen of Plants and On the General

Existence of Active Molecules in organic and inorganic bodies. **Edinburgh new Philosophical Journal**, p. 358-371, 1828.

BUNCH, J. S. et al. Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets. **Nano Letters**, v. 8, n. 8, p. 2458-2462, 2008.

BUONGIORNO, J. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 9, p. 1-14, 2009. ISSN 0021-8979.

BUZEA, C.; BLANDINO, I. I. P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles:Sources and toxicity. **Biointerphases**, v. 2, n. 4, p. MR17 - MR172, 2007.

CAMACHO, E. F. et al. **Control of Solar Energy systems**. First. ed. Londres: Springer, 2012.

CÁRDENAS, A. O. G. **Avaliação experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede simples em escoamento monofásico em regime turbulento**. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 138f. 2015.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

CHANDRASEKAR, M. et al. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 9, n. 1, p. 533-538, 2009.

CHAUPIS, J. E. R. **Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 162 f. 2011.

CHEN, H.; DING, Y.; TAN, C. Rheological behaviour of nanofluids. **New Journal of Physics**, v. 9, p. 25, 2007. ISSN 1367-2630.

CHOI, S. U. S. **Nanofluid technology**: current status and future research. Korea-U.S. Technical Conference on Strategic Technologies. Viena, VA: [s.n.]. 1998.

CHOI, S. U. S. et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions. **Applied Physics Letters**, v. 79, n. 14, p. 2252-2254, 2001. ISSN 0003-6951.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. International Mechanical Engineering Congress & Exposition. San Francisco, CA: [s.n.]. 1995.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. **Enhanced heat transfer using nanofluids**. 6 221 275, 24 Abril 2001.

CHON, C. H. et al. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. **Applied Physics Letters**, v. 87, p. 1-3, 2005. ISSN 0003-6951.

DAS, S. K. et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal Heat Transfer**, v. 125, p. 567-574, 2003.

DAS, S. K. et al. A Review of: Nanofluids: Science and Technology,. **Materials and Manufacturing Processes** , v. 24, n.5, p. 600-601, 2009.

DAS, S. K.; PUTRA, N.; ROETZEL, W. Pool boiling characteristics of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 5, p. 851–862, 2003. ISSN 0017-9310.

DING, Y. et al. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n.1-2, p. 240-250, 2006. ISSN 0017-9310.

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. 3, p. 443-461, 1930. ISSN 0735-1933.

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, 2001. ISSN 0003-6951.

EINSTEIN, A. Berichtigung zu meiner arbeit: Eine neue Bestimmung der molekul-dimension. **Annalen der Physik**, v. 399, n. 3, p. 591–592, 1911.

EINSTEIN, A. **Investigations on the Theory of, the Brownian Motion**. USA. 1956.

ESFE, M. H.; SEDODIN, S.; MAHMOODI, M. Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 52, p. 68–78, 2014. ISSN 0894-1777.

EVANS, W. et al. Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 5-6, p. 1431-1438, 2008. ISSN 0017-9310.

FASOLINO, A.; LOS, J. H.; KATSNELSON, M. I. Intrinsic ripples in graphene. **Nature Materials**, v. 6, p. 858-861, 2007.

FERROUILLAT, S. et al. Influence of Nanoparticle Shape Factor on Convective Heat Transfer of Water-Based ZnO Nanofluids. Performance Evaluation Criterion. **International Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 1, n.2, 2011. ISSN 2231 –6477.

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**, v. 58, p. 115 - 121, 2015. ISSN 0925-9635.

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, 2010. ISSN 0142-727X.

FRADKIN, E. Critical behavior of disordered degenerate semiconductors. II. Spectrum and transport properties in mean-field theory. **Physical Review B**, v. 33, n., p. 3263-3268, 1986.

GAO, L.; ZHOU, X. F. Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids. **Physics Letters A**, v. 348, n. 3 - 6, p. 355–360, 2006. ISSN 0375-9601.

GARCIA, C. F.; LUCAS, E. M. F.; BINATTI, I. **Química Orgânica: estrutura e propriedades**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Materials** , v. 6, p. 183-191, 2007.

GHANBARPOUR, M.; HAGHIGI, E. B.; KHODABANDEH, R. Thermal properties and rheological behavior of water based Al₂O₃ nanofluid as a heat transfer fluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, p. p. 227-235, 2014. ISSN 0894-1777.

GHOZATLOO, A. et al. Investigation of Nanoparticles Morphology on Viscosity of Nanofluids and New Correlation for Prediction. **Journal of Nanostructures**, v. 5, p. 161-168, 2015.

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.

GOHARSHADI, E. K. et al. Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review. **Physical Chemistry Research**, v. 1, n.1, p. 1-33, 2013.

GÓMEZ, A. O. C.; 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, 2015. ISSN 0017-9310.

HADDAD, Z. et al. Is It Important to Measure the Volumetric Mass Density of Nanofluids? **International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering**, v. 8, n. 2, p. 310-313, 2014.

HAGHIGHI, E. B. et al. Screening Single Phase Laminar Convective Heat Transfer of Nanofluids in a Micro-tube. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 395, n. 1, 2012.

HAMID, K. A. et al. Effect of Titanium Oxide Nanofluid Concentration on Pressure Drop. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 10, n. 17, p. 7815 - 7820, 2015. ISSN 1819-6608.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

HERIS, S. Z.; ETEMAD, S. G.; ESFAHANY, M. N. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 4, p. 529–535, 2006. ISSN 0735-1933.

HEYHAT, M. M. et al. Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 8, p. 1272–1278, 2012. ISSN 0735-1933.

HO, C. J. et al. Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 8, p. 1345–1353, 2010. ISSN 1290-0729.

HOFFMANN, A. R. K. **Análise Experimental do Desempenho Termo-hidráulico de Nanofluidos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 245 f. 2014.

HONG, K. S.; HONG, T. K.; YANG, H. S. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. **Applied Physics Letters**, v. 88, n. 3, p. 1-3, 2006. ISSN 0003-6951.

HONG, T. K.; YANG, H. S.; CHOI, C. J. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 97, n. 6, 2005. ISSN 0021-8979.

HOTZA, D. Review article: Tape Casting. **Cerâmica**, v. 43, n. 283-284, 1997. ISSN 1678-4553.

IJAM, A. et al. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 87, p. 92–103, 2015. ISSN 0017-9310.

IYAHRAJA, S.; RAJADURAI, J. S. Study of thermal conductivity enhancement of aqueous suspensions containing silver nanoparticles. **AIP Advances**, v. 5, p. 1-8, 2015. ISSN 2158-3226.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 84, n. 21, p. 4316-4318, 2004. ISSN 0003-6951.

JAVORNIK, G. **Aplicação de nanofluidos na recuperação avançada de petróleo**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, p. 114 f. 2013.

KAKAÇ, S.; PRAMUANJAROENKIJ, A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 3187–3196, 2009. ISSN 0017-9310.

KARTHIKEYAN, N. R.; PHILIP, J.; RAJ, B. Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids. **Materials Chemistry and Physics**, v. 109, p. 50-55, 2008. ISSN 0254-0584.

KAZI, S. N.; DUFFY, G. G.; CHEN, X. D. Validation of heat transfer and friction loss data for fibre suspensions in a circular and a coaxial pipe heat exchanger. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 79, p. 146-160, 2014. ISSN 1290-0729.

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, 2002. ISSN 0017-9310.

KEBLINSKI, P.; PRASHER, R.; EAPEN, J. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over? **Journal of Nanoparticle Research**, v. 10, n. 7, p. 1089– 1097, 2008.

KHANAFER, K.; VAFAI, K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 4410–4428, 2011. ISSN 0017-9310.

KHULLAR, V. et al. Harvesting solar thermal energy through nanofluid-based volumetric absorption systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 77, p. 377–384, 2014. ISSN 0017-9310.

KIM, S. J. et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 19-20, p. 4105–4116, 2007. ISSN 0017-9310.

KLEINSTREUER, C.; FENG, Y. Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 229, p. 1-13, 2011.

KOLE, M.; DEY, T. K. Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 113, n. 8, p. 1-8, 2013. ISSN 0021-8979.

KUMAR, A.; LEE, C. H. **Synthesis and Biomedical Applications of Graphene: Present and Future Trends, Advances in Graphene Science**. [S.I.]: inTech, 2013.

KUMAR, P. C. M.; KUMAR, J.; SENDHILNATHAN, S. Theoretical model to determine the thermal conductivity of nanofluidos. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 7, p. 2846-2852, 2010. ISSN 0975-5462.

KUMARESAN, V. et al. Convective heat transfer characteristics of CNT nanofluids in a tubular heat exchanger of various lengths for energy efficient cooling/heating system. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 60, n. 1, p. 413-421, 2013. ISSN 0017-9310.

KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. Experimental investigation of the thermophysical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 545, p. 180-186, 2012. ISSN 0040-6031.

KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. Experimental investigation of the thermophysical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 545, p. 180–186, 2012. ISSN 0040-6031.

LEE, C. et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. **Science**, v. 321, p. 385-388, 2008.

LEE, J. H.; LEE, S. H.; JANG, S. P. Do temperature and nanoparticle size affect the thermal conductivity of alumina nanofluids? **Applied Physics Letters**, v. 104, 2014. ISSN 0003-6951.

LI, C. H.; PETERSON, G. P. The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 101, 2007. ISSN 0021-8979.

LI, Y.-H.; QU, W.; FENG, J.-C. Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids. **Chinese Physical Letter**, v. 25, n. 9, p. 3319-3322, 2008.

MAHBUBUL, I. M.; SAIDURA, R.; AMALINA, M. A. A Thermal conductivity, viscosity and density of R141b refrigerant based Nanofluid. **Procedia Engineering**, v. 56, p. 310–315, 2013. ISSN 1877-7058.

MAHENDRAN, V.; PHILIP, J. Naked eye visualization of defects in ferromagnetic materials and components. **NDT & E International**, v. 60, p. 100–109, 2013. ISSN 0963-8695.

MARQUES, E. F. Da nanociênciа à nanotecnologia. **Revista de Ciéncia Elementar**, v. 2, n.3, p. 1-5, 2014. ISSN 0084.

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.

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, 1873. ISSN 0016-0032.

MEHRALI, M. et al. Facile synthesis of calcium silicate hydrate using sodium dodecyl sulfate as a surfactant assisted by ultrasonic irradiation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 2, p. 735–742, 2014a. ISSN 1350-4177.

MEHRALI, M. et al. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. **Nanoscale Research Letters**, v. 9, n. 15, 2014b.

MEHRALI, M. et al. Effect of specific surface area on convective heat transfer of graphene nanoplatelet aqueous nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 100–108, 2015a. ISSN 0894-1777.

MEHRALI, M. et al. Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 23–31, 2015b. ISSN 0735-1933.

MELINDER, A. **General properties and characteristics of aqueous solutions used in indirect systems**. 8th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. Copenhagen, Dinamarca: [s.n.]. 2008.

MISHRA, P. C. et al. A brief review on viscosity of nanofluids. **International Nano Letters**, v. 4, p. 109–120, 2014.

MOFFAT, R. J. Describing the uncertainties in xperimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 1, n.1, p. 3-17, 1988. ISSN 0894-1777.

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 2109–2125, 2008. ISSN 1359-4311.

NAIR, R. R. et al. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. **Science**, v. 320, p. 1308, 2008.

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, 2007a.

NAMBURU, P. K. et al. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 2, p. 397-402, 2007b. ISSN 0894-1777.

NAN, C.-W. et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. **Journal of Applied Physics**, v. 81, n. 10, p. 6692-6699, 1997. ISSN 0021-8979.

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, 2007. ISSN 0142-727X.

NIE, C.; MARLOW, W. H.; HASSAN, Y. A. Discussion of proposed mechanisms of thermal conductivity enhancement in nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 1342–1348, 2008. ISSN 0017-9310.

NOTT, M. Molecular reality: the contributions of Brown Einstein and Perrin. **School Science Review**, v. 86, n. 317, p. 39-46, 2005.

NOVOSELOV, K. S. Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland. **Reviews of Modern Physics**, v. 83, n. 3, p. 837-849, 2011. ISSN 0034-6861.

NOVOSELOV, K. S. et al. Two-dimensional atomic crystals. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United of America**, v. 102, n. 30, p. 10451-10453, 2005.

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.

OLARU, E. Zur Theorie der perfekten Graphen. **Journal of Combinatorial Theory**, v. 23, Series B, p. 94-105, 1977.

OLIVEIRA, G. A. **Síntese e caracterização de nanofluidos de prata**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 101f. 2012.

OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P.; WEN, D. Synthesis and characterization of silver/water nanofluids. **High Temperatures-High Pressure**, v. 43, p. 69 - 83, 2014.

ÖZERİNÇ, S.; KAKAÇ, S.; YAZICIOĞLU, A. G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 8, n. 2, p. 145-170, 2010.

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.

PAKDAMAN, M. F.; BEHABADI, A. M. A.; RAZI, P. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 103–111, 2012. ISSN 0894-1777.

PARKER, I. D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes. **Journal of Applied Physics**, v. 75, n. 3, p. 1656-1666, February 1994. ISSN 0021-8979.

PAUL, G. et al. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1913-1924, 2010. ISSN 1364-0321.

PAZ, J. G. P. **Avaliação Experimental da Transferência de Calor e Perda de Pressão de Nanofluidos de Prata no Interior de Tubos Horizontais**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 161 f. 2014.

PEIERLS, R. Quelques propriétés typiques des corps solides. **Annales de L' Institut Henry Poincaré**, v. 5, n. 3, p. 177-222, 1935.

PETUKHOV, B. S. Heat Transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. **Advances in heat transfer**, v. 6, n. 503, p. 503-565, 1970.

PRASHER, R.; PHELAN, P. E.; BHATTACHARYA, P. Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model for the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 128, n. 6, p. 588-595, 2006a.

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, 2006b.

PUTRA, N.; ROETZEL, W.; DAS, K. S. Natural convection of nano-fluids. **Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 8, p. 775-784, 2003.

RASHMI, W. et al. Preparation, thermo-physical properties and heat transfer enhancement of nanofluids. **Materials Research Express**, v. 1, n. 3, p. 47, 2014. ISSN 2053-1591.

SADEGHINEZHAD, E. et al. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions. **Industrial Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 31, p. 12455-12465, 2014.

SADEGHINEZHAD, E. et al. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466-487, 2016. ISSN 0196-8904.

SADRI, R. et al. An experimental study on thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes. **Nanoscale Research Letters**, v. 9, n. 1, p. 1-16, 2014.

SAEEDINIA, M.; BEHABADI, A. 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, n. 1, p. 152-159, 2012. ISSN 0735-1933.

SANTOS, W. N. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, v. 48, n. 306, 2002. ISSN 1678-4553.

SERGIS, A.; HARDALUPAS, Y. Anomalous heat transfer modes of nanofluids: a review based on statistical analysis. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 391, 2011.

SMOUT, P. D. **VKI Temperature Measurement: Thermocouples Probe Installation and Design Criteria**. [S.I.]: Rolls Royce reprint, 1996.

SUDARMADJI, S. et al. Effects of Cooling Process of Al₂O₃-water Nanofluid on Convective Heat Transfer. **FME Transactions**, v. 42, p. 155-161, 2014.

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, 2013. ISSN 1364-0321.

SUNDAR, L. S.; SINGH, M. K.; SOUSA, A. C. M. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 44, p. 7-14, 2013. ISSN 0735-1933.

THANG, B. H. et al. Application of Multiwalled Carbon Nanotube Nanofluid for 450 W LED Floodlight. **Journal of Nanomaterials**, v. 2014, p. 1-6, 2014.

THOMAS, S.; SOBHAN, C. B. P. A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n.1, p. 1-21, 2011.

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. 1-10, 2009. ISSN 0021-8979.

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K. Measurements of Specific Heat and Density of Al₂O₃Al₂O₃ Nanofluid. **Mesoscopic, Nanoscopic and Macroscopic Materials**, v. 1063, p. 361 - 370, 2008.

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. 1-7, 2009. ISSN 0022-1481.

WANG, B.-X.; ZHOU, L.-P.; PENG, X.-F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n.14, p. 2665–2672, 2003. ISSN 0017-9310.

WANG, X. J.; LI, X. F. Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity. **Chinese Physics Letters**, v. 26, n.5, p. 1-4, 2009.

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, 1999.

XIE, H. et al. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 7, p. 4568-4572. ISSN 0021-8979.

XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for Heat Transfer Correlations of Nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701–3707, 2000. ISSN 0017-9310.

YANG, Y. et al. Characterization and Convective Heat Transfer With Nanofluids. **American Society of Mechanical Engineers Proceedings**, p. T30087-T30087-6, 2011. ISSN 7918-3892.

YIAMSAWASD, T.; DALKILIC, A. S.; WONGWISES, S. Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 545, p. 48-56, 2012. ISSN 0040-6031.

YU, C.-J. et al. Molecular layering in a liquid on a solid substrate: an X-ray reflectivity study. **Physica B**, v. 283, p. 27-31, 2000. ISSN 0921-4526.

YU, W. et al. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. **Physics Letters A**, v. 375, n. 10, p. 1323–1328, 2011. ISSN 0375-9601.

YU, W.; XIE, H. . C. L.; LI, Y. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. **Thermochimica Acta**, v. 491, p. p. 92–96, 2009. ISSN 0040-6031.

ZANJANI, H. A.- et al. Experimental investigation of laminar forced convective heat transfer of Graphene–water nanofluid inside a circular tube. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 100, p. 316–323, 2016. ISSN 1290-0729.

ZANJANI, H. et al. Turbulent convective heat transfer and pressure drop of graphene–water. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 35, p. 1230-1240, 2013.

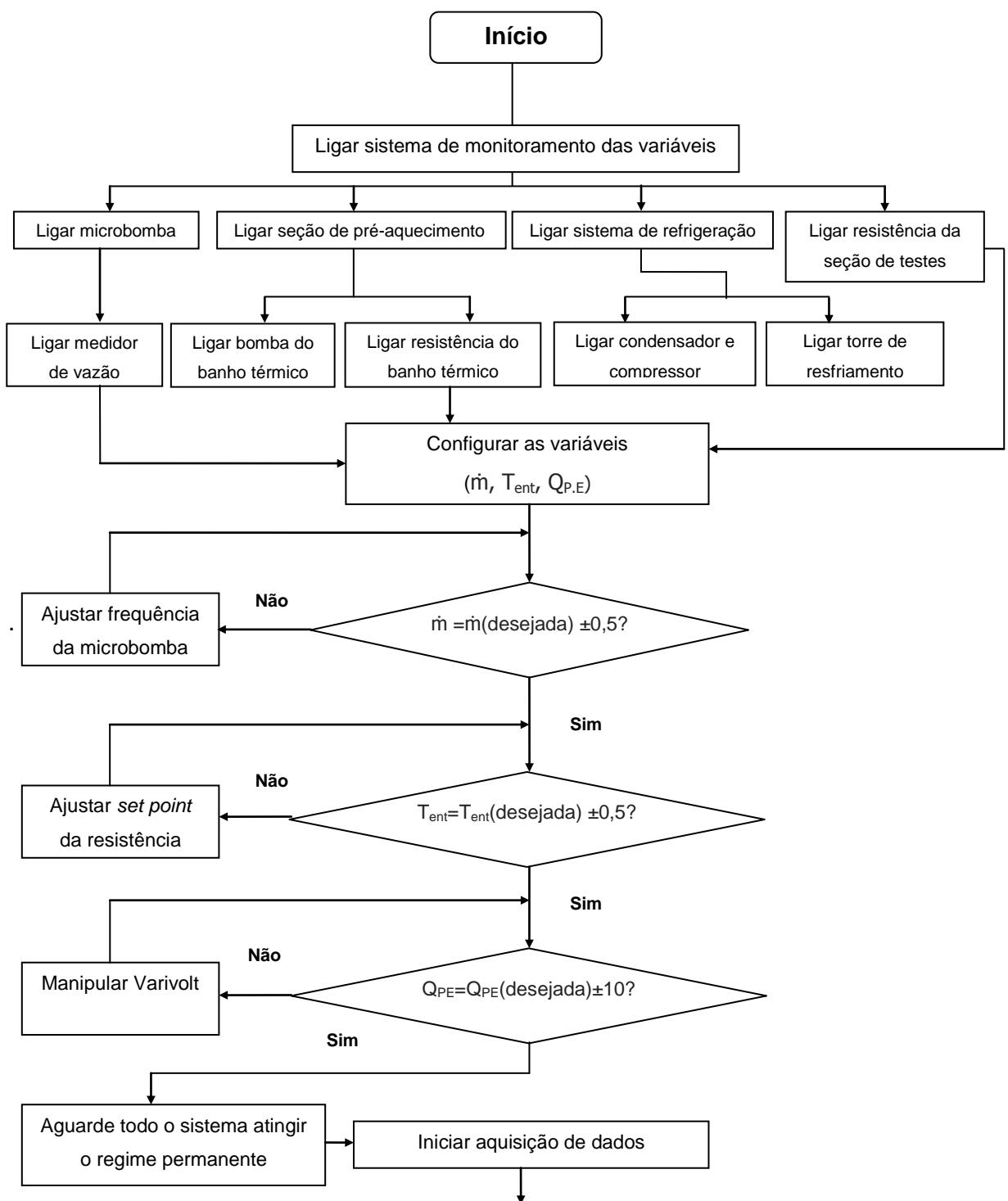
ZHAO, J. F. et al. Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and pH Value. **Chinese Physics Letters**, v. 26, n.6, p. 1-3, 2009.

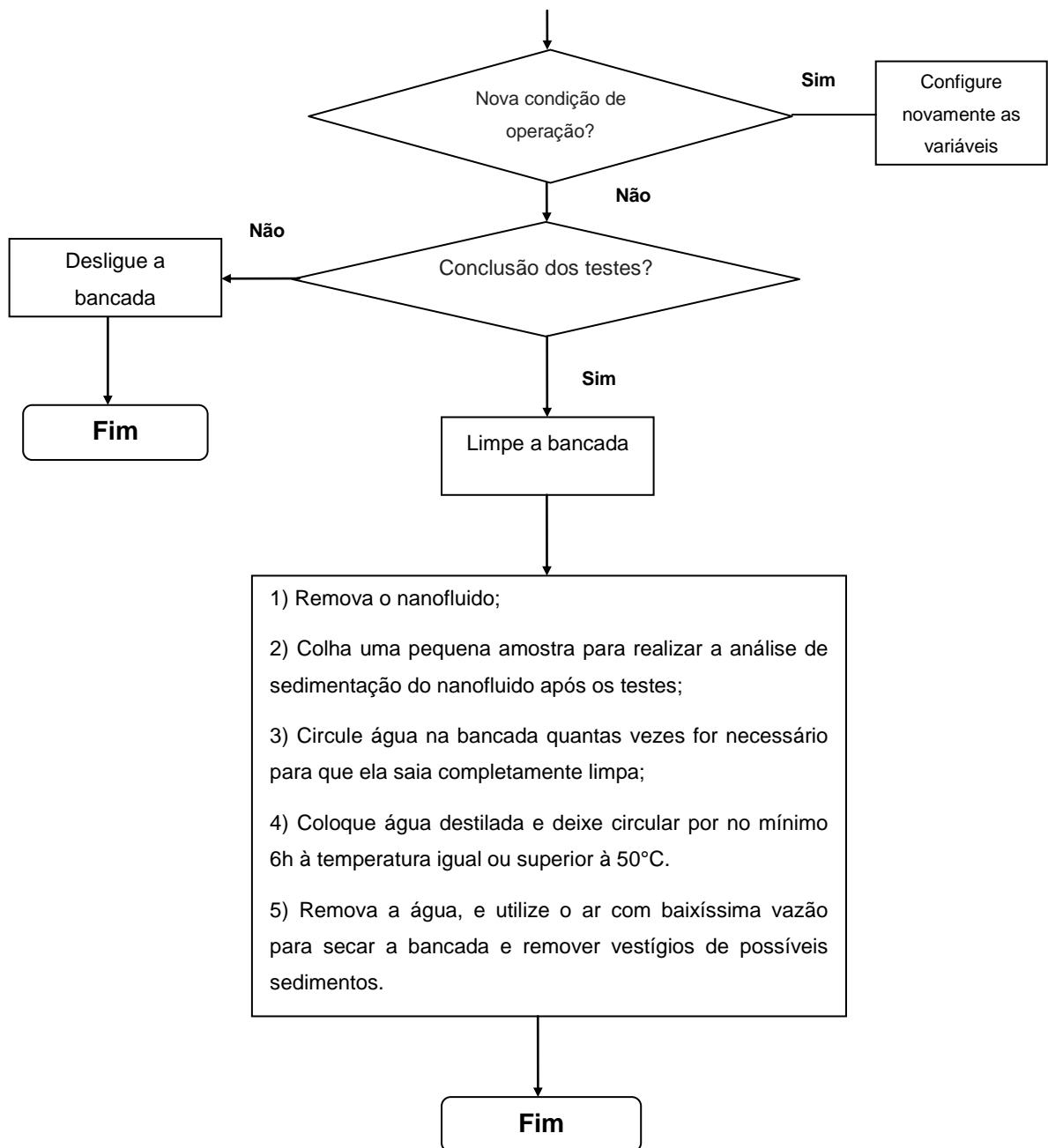
ZHOU, L.-P. et al. On the Specific Heat Capacity of CuO Nanofluid. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2010, p. 1-4, 2010. ISSN 1687-8132.

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.

APÊNDICE A

FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DA BANCADA TERMO-HIDRÁULICA





APÊNDICE B

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Geralmente, o resultado de uma medição de uma grandeza é apenas uma estimativa, ou uma aproximação do valor verdadeiro do mensurado. Como consequência, o resultado da medição somente é completo quando acompanhado do valor declarado da incerteza. Deste modo, nesta seção é apresentada a incerteza associada aos equipamentos, denominada de incerteza primária, e a incerteza das medições propagada para as variáveis calculadas, denominada de incerteza secundária.

A Tabela B.1 apresenta a incerteza associada aos instrumentos utilizados para construção da bancada experimental e no processo de preparação das amostras de nanofluido.

Tabela B.1 - Incerteza dos parâmetros primários.

Instrumento	Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza
Termopar tipo T	$T_{p,int}$	-200 a 350 °C	±0,18 °C
PT100	T_e e T_s	-200 a 500 °C	±0,11 °C
Transmissor de pressão	P_e e P_s	0 a 100 kPa	±0,66 kPa
Transmissor de pressão diferencial	ΔP	0 a 300 kPa	±0,25 %
Medidor de vazão tipo coriolis	\dot{m}	0,0098 a 0,1686 kg/s	±0,15 %
Sensor de efeito Hall (corrente)	I	0 a 20A	±0,09 A
Sensor de efeito Hall (voltagem)	V	0 a 320V	±0,7 V
Balança analítica (BK-500)	m	0,01 a 510 g	± 0,0001 g
Trena	L,x	0 a 5 m	±0,5 mm
Paquímetro	D	0 a 15 cm	± 0,01 mm
Viscosímetro (massa específica)	r	0,65 a 3 g/cm ³	±0,0005 g/cm ³
Viscosímetro (viscosidade dinâmica)	μ	0,2 a 20000 mPa.s	±0,35%
Condutivímetro (cond. térmica)	k	0,01 a 1 W/ (mK)	±3%

A incerteza dos parâmetros secundários foi determinada diretamente com o auxílio do software EES (do inglês, *Engineering Equation Solver*). O EES está baseado na “lei de propagação de incertezas” proposto por Kline e McClintock, apud (MOFFAT, 1988). A expressão da incerteza de medição inicia pelo estabelecimento de um modelo matemático para a medição. O parâmetro secundário, y , não é medido diretamente, mas é determinado a partir de n outras grandezas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n através de uma relação funcional f como define a Eq. (B.1).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{B.1})$$

Logo, a expressão que corresponde ao valor do parâmetro secundário pode ser dado pela Eq. (B.2).

$$y = y_m \pm \delta y \quad (\text{B.2})$$

Onde y_m , é o valor médio do parâmetro secundário e δy é a incerteza obtida pela Eq. (B.3).

$$\delta y = \sqrt{[(Sx_1)(\delta x_1)]^2 + [(Sx_2)(\delta x_2)]^2 + \dots + [(Sx_n)(\delta x_n)]^2} \quad (\text{B.3})$$

Em que o parâmetro primário, x_n , pode ser definido pela Eq. (B.4).

$$x_n = x_{m,n} \pm \delta x_n \quad (\text{B.4})$$

Onde, $x_{m,n}$, é o valor médio do parâmetro primário, x_n , e δx_n é a incerteza de sua medida.

Os coeficientes de sensibilidade, Sx_n , são calculados através das derivadas parciais de y em relação a cada variável x , conforme a Eq. (B.5).

$$Sx_n = \frac{\partial y}{\partial x_n} \quad (B.5)$$

Assim, a Tabela B.2 apresenta a incerteza dos parâmetros secundários.

Tabela B.2 - Incerteza obtida para os parâmetros secundários.

Variável	Parâmetro	Incerteza
Potência elétrica (experimental)	$Q_{P.E.}$	$\pm 3,8\%$
Fluxo de calor	q''	$\pm 1,5\%$
Número de Reynolds	Re	$\pm 0,3\%$
Fator de atrito	f	$\pm 1,0\%$
Coef. médio de transf. de calor por convecção	h_m	$\pm 7,8\%$
Valor médio do número de Nusselt	Nu_m	$\pm 7,5\%$
Velocidade mássica	G	$\pm 0,7\%$
Potência de bombeamento na seção de testes	\dot{W}_B	$\pm 0,4\%$