

**ANTONIO REMI KIELING HOFFMANN**

**Análise Experimental do Desempenho Termo-hidráulico  
de Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em  
Escoamento Monofásico**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2014

**ANTONIO REMI KIELING HOFFMANN**

**Análise Experimental do Desempenho Termo-hidráulico  
de Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em  
Escoamento Monofásico**

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

Área de concentração:  
**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.**

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

Uberlândia - MG

2014

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

---

H711a Hoffmann, Antonio Remi Kieling, 1965-  
2014 Análise experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos  
de nanotubos de carbono em escoamento monofásico / Antonio Remi  
Kieling Hoffmann. - 2014.  
245 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Calor - Transmissão - Teses. 3. Ca-  
lor - Convecção - Teses. 4. Nanopartículas - Teses. 4. Nanotubos de carbo-  
no - Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone. II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

---

CDU: 621

*Aos meus filhos, **Gabi, Julia e Heron** e à minha namorada **Paty**.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional ao longo de todo este caminho.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela oportunidade, confiança, incentivo e apoio durante todas as etapas e principalmente pela dedicada orientação.

Ao pessoal do Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, LEST, em especial aos estudantes Juan Gabriel Paz Alegrias, Guilherme Azevedo Oliveira, Abdul Cardenas e demais colegas pela amizade e pelas discussões que tanto ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Registro também um agradecimento especial ao meu querido amigo e colega João Bosco Coelho, pela incansável atenção e motivação.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, juntamente ao Programa de Pós-Graduação, pelo suporte e infra-estrutura dedicados para a realização de meus trabalhos e ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão, IFMA, na pessoa do Prof. Dr. Keyll Carlos Ribeiro Martins pela idealização e coordenação do DINTER em Engenharia Mecânica.

Em especial, à Patrícia, minha namorada, pelo amor, pela compreensão, pela força e confiança mas, principalmente, pelo incentivo e ao cuidado e atenção aos nossos filhos.

HOFFMANN, A. R. K, **Análise Experimental do Desempenho Termo-hidráulico de Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em Escoamento Monofásico** 2014. xxx f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

A presente pesquisa trata de um estudo experimental da transferência de calor por convecção e da perda de carga de nanofluidos de nanotubos de carbono à base de água (NTCs/H<sub>2</sub>O) em escoamento monofásico turbulento no interior de tubo reto e horizontal. Para tanto, foi desenvolvido um equipamento experimental cujo componente básico é composto por um tubo horizontal, aquecido por intermédio de uma resistência elétrica do tipo fita, aderida à superfície externa do tubo. Os ensaios experimentais foram realizados cobrindo uma ampla faixa de velocidades mássicas de 600 até 3200 kg/s.m<sup>2</sup>, (número de Reynolds variando de 2300 a 30000), onde preponderam os regimes de transição e turbulento de escoamento. O fluxo específico de calor pela parede do tubo variou entre 10 e 18 kW/m<sup>2</sup>. Os ensaios foram realizados em três diferentes condições para a temperatura do fluido na entrada da seção de teste, isto é, 10, 15 e 20 °C. Além da análise dos parâmetros usuais que afetam a transferência de calor e a perda de carga, o comportamento do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O também foi analisado com o objetivo de verificar os distintos efeitos da razão de aspecto dos nanotubos de carbono, da concentração em massa de nanopartículas na suspensão e da deposição de nanopartículas na parede do tubo. O desempenho termo-hidráulico, relativo ao efeito combinado da transferência de calor e da perda de carga das amostras de nanofluido foi superior quando comparados aos resultados experimentais levantados para a água. Os resultados experimentais levantados para as amostras de nanofluido de nanotubos de carbono à base de água também foram comparados com os valores calculados a partir de correlações especialmente derivadas para nanofluidos. Finalmente, a análise dos resultados experimentais do presente trabalho permitiu a proposição de uma correlação para o coeficiente de transferência de calor para nanofluidos, que apresentou desvios bastante reduzidos em relação aos resultados experimentais.

**Palavras-chave:** Nanofluidos, Nanopartículas, Nanotubos de Carbono, Convecção, Transferência de Calor, Perda de Carga.

HOFFMANN, A. R. K, **Análise Experimental do Desempenho Termo-hidráulico de Nanofluidos de Nanotubos de Carbono em Escoamento Monofásico** 2014. xxx f. 2009. 168 f. Doctor Thesis,, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

The present research deals with an experimental study of the heat transfer and pressure drop of nanofluids composed by carbon nanotubes and distilled water in single-phase flow inside a horizontal straight tube. An experimental bench has been developed and constructed whose the main component was a horizontal brass tube electrically heated by tape resistors wrapped on the external surface. Experimental results have been obtained for a wide range of mass velocities, 600 up to  $3200 \text{ kg/s.m}^2$ , (Reynolds varying from 2300 to 30000) corresponding to the transition and turbulent flow regimes. The specific heat flux varied from 10 to  $18 \text{ kW/m}^2$ . Tests were conducted for three different temperatures at the test section inlet, 10, 15 and  $20^\circ\text{C}$ . Other effects on the heat transfer coefficient were also analyzed such as: aspect ratio of the carbon nanotubes; mass concentration and nanoparticle deposition on the wall. The thermal-hydraulic performance obtained for the nanofluid was higher in comparison with distilled water. The experimental results were compared with the leading correlations from the literature. Finally, an empirical correlation for the heat transfer coefficient was proposed, with a very good agreement in relation to the experimental results using nanofluids.

**Keywords:** *Nanofluid, Nanoparticle, Carbon Nanotubes, Convection, Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop.*



## **Lista de Figuras**

2.1	Amostra de grafite (a); esquema do arranjo estrutural (b) - Adaptada.	14
2.2	Amostra de diamante (a); esquema do arranjo estrutural (b) - Adaptada.	15
2.3	Esquema da configuração estrutural do fulereno ( $C_{60}$ ) e Pavilhão da EXPO 67 - Adaptada.	16
2.4	Nanotubos de carbono de parede dupla e nanotubo de carbono de paredes multiplas (a) - (IIJIMA, 1991); Imagem de microscópio eletrônico de transmissão (TEM) de um nanotubo de carbono de paredes multiplas (b) - (ZENG <i>ET AL</i> , 2006).	17
2.5	Folha de grafeno bi dimensional; $\vec{C}$ - Vetor quiral, $\vec{a}_1$ e $\vec{a}_1'$ - Vetores unitários da célula hexagonal , $\theta$ - Ângulo quiral. - Adaptada de (BELIN E EPRON, 2005).	19
2.6	Imagen por microscópio eletrônico de varredura de SWCNTs preparados sobre substratos de quartzo. (a) Nanotubos alinhados, normais a superfície do substrato e (b) nanotubos depois da remoção de impurezas dos extremos dos tubos.	23
2.7	Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (LI E XUAN, 2002).	51
2.8	Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (GARG <i>ET AL</i> , 2009).	53
2.9	Imagens HRTM de nanotubos de carbono de paredes multiplas (CHOI <i>ET AL</i> , 2001).	58
2.10	(a) Imagens TEM de nanotubos de carbono; (b) espectroscopia Raman dos nanotubos de carbono (AMROLLAHI <i>ET AL</i> , 2009).	59
2.11	Imagens MEV das nanopartículas do nanofluido de NTCs à base de água preparados por métodos de dois passos: (a) agitador (b) banho de ultra-sons (c) disruptor de ultra-sons (a barra de escala inserida é de 500 nm) (AMROLLAHI <i>ET AL</i> , 2009).	60
2.12	Imagen SEM de MWCNTs dispersos (0.45 % vol.) (KUMARESAN <i>ET AL</i> , 2013).	62

2.13 Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (DING <i>ET AL</i> , 2006). . . . .	69
2.14 Diagrama esquemático da configuração experimental (KUMARESAN <i>ET AL</i> , 2013). . . . .	71
3.1 Tubo da seção de teste, ilustrando as ranhuras para fixação dos termopares. . . . .	75
3.2 Fotografia da resistência elétrica de fita flexível aderida à parede do tubo. . . . .	76
3.3 Isolamento da seção de teste. . . . .	76
3.4 Diagrama esquemático da seção de teste. . . . .	76
3.5 Detalhe do sensor de temperatura modelo PT100. . . . .	77
3.6 Detalhe da instalação da termorresistência tipo PT-100 para medição da temperatura do fluido na entrada e na saída da ST. . . . .	78
3.7 Rolo de fios para termopares tipo AWG-30, junção (a); fixação do termopar na parede do tubo (b). . . . .	78
3.8 Transdutor de pressão modelo PA3023 (a); transmissor de pressão diferencial, modelo Deltabar S PMD75 (b). . . . .	79
3.9 Ilustração esquemática da instalação dos medidores de pressão e do medidor de pressão diferencial. . . . .	79
3.10 Representação esquemática dos circuitos termo-hidráulicos. . . . .	80
3.11 Desenho esquemático do trocador/reservatório. . . . .	81
3.12 Bomba magnética de engrenagem, modelo 45- LIQUIFLO. . . . .	82
3.13 Esboço da seção de visualização. . . . .	83
3.14 Medidor de vazão mássica (sensor RHM06 / conversor CMM01 - METROVAL). . . . .	83
3.15 Placa de aquisição cDAQ e módulos da National Instruments. . . . .	86
3.16 Variadores de frequência VLT, série 2800. . . . .	86
3.17 Tela principal da interface gráfica em LabView / sistema refrigeração. . . . .	87
3.18 Tela principal da interface gráfica em LabView / seção de teste. . . . .	88
3.19 Foto do aparato experimental. . . . .	89
3.20 Resultados experimentais relacionando a potência elétrica, $Q_{for}$ , aplicada na seção de teste com a potência calculada pelo balanço de energia, $Q_{exp}$ , para testes com água destilada. . . . .	94

3.21	Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente e aquele calculado pela correlação de Gnielinski para testes com água destilada. . . . .	95
3.22	Resultados obtidos para $\Delta P_{exp}/L$ com água destilada escoando no interior do tubo da ST para diferentes velocidades mássicas, $G$ . . . . .	96
3.23	Resultados obtidos para $f_e \times Re$ com água destilada escoando no interior do tubo da ST. . . . .	97
3.24	Resultados de $\Delta P_{exp}/L \times Re$ das misturas propileno-glicol/água, TyFoxit/água e água destilada, escoando segundo diferentes $\dot{m}$ , e nas condições térmicas de $10^{\circ}C$ e $10\text{ kW}/m^2$ . . . . .	98
3.25	Resultados de $\Delta P_{exp}/L \times G$ para misturas propileno-glicol/água, TyFoxit/água e água destilada, escoando segundo diferentes, $\dot{m}$ , e nas condições térmicas de $10^{\circ}C$ e $10\text{ kW}/m^2$ . . . . .	99
3.26	Comparação dos resultados obtidos para $\Delta P_{exp}/L \times Re$ . . . . .	100
3.27	Comparação dos resultados obtidos para $\Delta P_{exp}/L \times G$ . . . . .	100
3.28	Comparação dos resultados experimentais para $h_{exp} \times G$ . . . . .	101
3.29	Comparação dos resultados experimentais para $h_{exp} \times Re$ . . . . .	102
3.30	Dados experimentais de $T_{ent}$ para um ensaio específico ilustrando o sistema de controle da $T_{ent}$ durante a aquisição de dados. . . . .	103
3.31	Diagrama esquemático ilustrando a ST e as condições de vazão mássica de fluido, fluxo de calor e os pontos de medição da temperatura do fluido e da parede e os pontos de medição de pressão. . . . .	104
3.32	Medidas de temperatura de um ensaio específico; temperatura da parede em diferentes posições axiais e temperatura do fluido na entrada e na saída da ST. .	105
4.1	(a) Homogeneizador de alta pressão ; (b) Esquema do processo de homogeneização de alta pressão; (c) Esquema da câmara de compressão. . . . .	116
4.2	Equipamento de usinagem por ultrassom. . . . .	117
4.3	Fotografias das amostras de nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O. . . . .	118

4.4 Imagens da amostra NT05: (a) sonicada; (b) homogeneizada; (c) após 24 horas depois de preparada (d) após ter sido submetida ao circuito do equipamento experimental. . . . .	119
4.5 Imagens da amostra NT04: (a) Como preparada; (b) Após ter sido aplicada ao equipamento experimental para os ensaios termo-hidráulicos. . . . .	120
4.6 Imagens da amostra NT05:(a) assim que agitada; (b) e (c) nos tempos de 5 e 10 minutos após ter sido agitada. . . . .	120
4.7 Imagens da amostra NT04: (a) recém agitada; (b) e (c) após 12 e 24 horas depois de ter sido agitada . . . . .	121
4.8 Comportamento da massa específica da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O em função da variação da temperatura do fluido. . . . .	123
4.9 Comportamento do calor específico da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O em função da variação da temperatura do fluido. . . . .	124
4.10 Comportamento do calor específico da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O em função da variação da temperatura, segundo a Eq. (4.4). . . . .	125
4.11 Reômetro utilizado nos experimentos (Fonte: (OLIVEIRA, 2012)). . . . .	126
4.12 Resultados experimentais: viscosidade das amostras de nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O. . . . .	127
4.13 Sonda Hukseflux TP-08 (Fonte: (OLIVEIRA, 2012)). . . . .	130
4.14 Representação esquemática da sonda de estado não estacionário: A sonda consiste de uma agulha (3) com uma única junção de termopar (6) e um fio de aquecimento (5). Na base, (2), está montado um sensor de temperatura, (4). . . . .	131
4.15 Resultados experimentais para a condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O . . . . .	132
4.16 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H <sub>2</sub> O - NT01. . . . .	136
4.17 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H <sub>2</sub> O - NT02. . . . .	137
4.18 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H <sub>2</sub> O - NT03. . . . .	138
4.19 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H <sub>2</sub> O - NT04. . . . .	139
4.20 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H <sub>2</sub> O - NT05. . . . .	140
4.21 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; H <sub>2</sub> O - NT01. . . . .	141

4.22 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; (a) H <sub>2</sub> O - NT02, (b) H <sub>2</sub> O - NT03. . . . .	142
4.23 Comparação dos resultados experimentais $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; (a) H <sub>2</sub> O - NT04, (b) H <sub>2</sub> O - NT05. . . . .	143
4.24 Efeito da fração em massa de nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT02 e NT04; (a) $\Delta P_{exp}/L \times G$ e (b) $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; . . . . .	145
4.25 Efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT03 e NT04; (a) $\Delta P_{exp}/L \times G$ e (b) $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; . . . . .	146
4.26 Efeito do espécime de nanotubos de carbono utilizado na preparação da dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT01, NT04 e NT05; (a) $\Delta P_{exp}/L \times G$ e (b) $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; . . . . .	148
4.27 Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT01 e H <sub>2</sub> O; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	152
4.28 Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT02 e H <sub>2</sub> O; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	153
4.29 Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT03 e H <sub>2</sub> O; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	154
4.30 Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT04 e H <sub>2</sub> O; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	155
4.31 Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT05 e H <sub>2</sub> O; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	157
4.32 Efeito da fração em massa de nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT02 e NT04; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ .	159
4.33 Efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT03 e NT04; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ .	161
4.34 Efeito do espécime de nanotubos de carbono utilizado na preparação na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT01, NT04 e NT05; (a) $h_{exp} \times G$ , (b) $h_{exp} \times Re$ . . . . .	163

4.35 Coeficiente de transferência de calor do nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O (amostra NT01) e água destilada para fluxo de calor de 10 kW/m <sup>2</sup> e vazões mássicas de 20, 50 e 90 g/s. 165
4.36 Coeficiente de transferência de calor por convecção da versão nanofluídica, amostra NT01, e água destilada para $T_{ent}$ de 10 °C e vazões mássicas de 20, 50 e 90 g/s. . . . . 166
5.1 A comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos obtidos a partir das equações de modelos clássicos de previsão da viscosidade de suspensões sólido-líquido. . . . . 172
5.2 Viscosidade do nanofluido NTCs/H <sub>2</sub> O, água destilada e os valores previstos pelos modelos. . . . . 173
5.3 Comparação entre as correlações clássicas e os resultados experimentais para a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O, ( $\theta = 0,24\%$ ). . . . . 176
5.4 Resultados experimentais para a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O, ( $\theta = 0,24\%$ ), e da água destilada com a superposição das curvas das correlações especialmente desenvolvidas para nanofluidos. . . . . 178
5.5 Resultados experimentais para o fator de atrito do nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O, ( $\theta = 0,24\%$ ), com a superposição das curvas das correlações. . . . . 180
5.6 Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Gnielinski, Sundar, Wongwises e Vrijha. . . . . 185
5.7 Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Dittus-Boelter, Pak e Cho e Maiga. . . . . 186
5.8 Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Gnielinski, Dittus-Boelter, Xuan e Li e Asirvatham. . . . . 187
5.9 Correlação dos resultados experimentais para nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O com concentração volumétrica de 0,24%. . . . . 189
5.10 Comparação da correlação proposta, Eq. (5.29), com resultados experimentais do número de Nusselt das amostras de nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O ensaiadas em diferentes temperaturas de entrada. . . . . 190

5.11 Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção com a Eq. (5.30), a partir dos Nusselt da correlação proposta. . . . .	191
5.12 Resultados experimentais da amostra NT01, ( $T_{ent} = 10^\circ C$ , $Q_{for} = 10 \text{ kW/m}^2$ e $\dot{m}$ variando de 20 a 100g/s, com incremento de 10 g/s), em superposição com as curvas das correlações. . . . .	192
5.13 Resultados experimentais da amostra NT02 ( $T_{ent} = 10^\circ C$ , $Q_{for} = 18 \text{ kW/m}^2$ e $\dot{m} = 20 \rightarrow 100 \text{ g/s}$ ), em superposição com as curvas das correlações. . . . .	193
5.14 Resultados experimentais para a amostra NT03/(0, 24%). . . . .	193
5.15 Comparação dos resultados experimentais com a correlação proposta no presente estudo e com as correlações de Wongwises, Vijjha e Asirvatham. . . . .	194
5.16 Comparação dos resultados experimentais com a correlação proposta pelo presente estudo e com as correlações de Wongwises, Vijjha e Asirvatham. . . . .	195



## **Lista de Tabelas**

2.1	Condutividade térmica de alguns materiais e fluidos utilizados em nanofluidos. . . . .	31
2.2	Modelos analíticos e empíricos para estimar a condutividade térmica de nanofluidos. Adaptada de (Singh (2008)). . . . .	44
2.3	Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade de nanofluidos. . . . .	47
2.4	Modelos analíticos e empíricos para estimar o número de Nusselt de nanofluidos. .	55
2.5	Nanofluidos de nanotubos de carbono e respectivo aumento da condutividade térmica da suspensão em relação a condutividade térmica do fluido base conforme relatado na literatura. . . . .	65
2.6	Resumo dos resultados das medições de condutividade térmica de nanofluidos realizadas pelo grupo de Assael et al. (2006). . . . .	67
3.1	Testes preliminares . . . . .	90
3.2	Planilha de experimentos para H <sub>2</sub> O - 01 . . . . .	108
3.3	Precisão e incertezas dos parâmetros envolvidos nos ensaios. . . . .	109
4.1	Características das amostras de nanofluidos utilizadas no presente trabalho. . . . .	113
4.2	Variação dos parâmetros operacionais de ensaio. . . . .	114
4.3	Materiais e respectivas quantidades empregadas na preparação das amostras. . . .	115
4.4	Viscosidade dinâmica para as amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O - $\mu$ [cP]. .	127
4.5	Condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H <sub>2</sub> O e da água destilada em $W/m^{\circ}C$ . . . . .	132
4.6	Comparação dos resultados experimentais levantados para as amostras em relação à água. . . . .	167

- 5.1 Desvios médios proporcionados pelas correlações em relação aos resultados experimentais do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com concentração volumétrica de 0,24 %. 188

## Lista de Símbolos

### Letras Latinas

$a$	Razão entre a condutividade térmica da nanopartícula e do fluido base
$A_{sr}$	Área da seção transversal do tubo
$Ag$	Prata
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio (alumina)
$Ar$	Argônio
$As$	Arsênio
$Au$	Ouro
$\vec{a}_1$ e $\vec{a}_1$	Vetores unitários de uma célula hexagonal do grafeno
$B$	Boro
$BN$	Nitreto de Boro
$C$	Carbono
$c$	Comprimento da circunferência
$\vec{C}$	Vetor Quiral
$CH_4$	Metano
$Cl$	Cloro
$Cu$	Cobre
$CuO$	Óxido de cobre
$c_v$	Calor específico (volume constante)
$c_vT$	Energia interna por unidade de massa
$c_p$	Calor específico (pressão constante)
$d$	Diâmetro do nanotubo de carbono

$D$	Diâmetro interno do tubo da ST
$0D$	Zero dimensional
$1D$	Unidimensional
$3D$	Tridimensional
$\dot{E}_{ac}$	Fluxo de energia acumulada no volume de controle
$\dot{E}_e$	Taxa de energia na entrada no volume de controle
$\dot{E}_g$	Fluxo de energia gerada o volume de controle
$\dot{E}_s$	Taxa de energia na saída do volume de controle
$\dot{E}_T$	Taxa de transporte de energia
$f$	Fator de atrito
$f_C$	Fator de atrito de Colebrook
$f_D$	Fator de atrito de Darcy
$f_H$	Fator de atrito de Haaland
$f_P$	Fator de atrito de Petukhov
$Fe$	Ferro
$G$	Velocidade mássica $[\dot{G}]$
$GA$	Goma arábica
$Ge$	Germânio
$G14$	Grupo 14 da tabela periódica
$H$	Hidrogênio
$HC$	Hidrocarboneto
$He$	Hélio
$h$	Coeficiente de transferência de calor
$k$	Condutividade térmica
$k_{fb}$	Condutividade térmica do fluido base
$k_{enf}$	Condutividade térmica efetiva do nanofluido
$k_{nf}$	Condutividade térmica do nanofluido
$k_{np}$	Condutividade térmica das nanopartículas
$L$	Comprimento do tubo da seção de teste

$l$	Comprimento do nanotubo de carbono
$\dot{m}$	Vazão mássica
$m_{fb}$	Massa de fluido base
$m_{nf}$	Massa total de nanofluido
$m_{np}$	Massa de nanopartículas
$N$	Nitrogênio
$Na$	Sódio
$Nu$	Número de Nusselt (coeficiente adimensional de transferência de calor)
$np^3$	Ligaçāo interatômica - hibridaçāo
$ns^2$	Ligaçāo interatômica - hibridaçāo
$O$	Oxigênio
$P$	Fósforo
$P$	Pressão
$P_{er}$	Perímetro da seção reta do tubo
$pH$	Potencial hidrogeniônico
$Pot$	Potencia de bombeamento para vencer a perda de carga
$Pr$	Número de Prandtl
$q_{conv}$	Taxa de transferência de calor por convecção
$q''_{sup}$	Fluxo térmico pela parede
$r$	Razão de aspecto do nanotubo de carbono $r = l/d$
$r_0$	Raio interno do tubo da ST
$Re_D$	Número de Reynolds para tubo circular de diâmetro interno $D$
$R_k$	Resistencia Kapitza
$S$	Enxofre
$Sb$	Antimônio
$Se$	Selênio
$Si$	Silício
$SiC$	Carboneto de silício
$Ti$	Titânio

$T_{M(e)}$	Temperatura média (de mistura) do fluido na entrada
$T_{M(s)}$	Temperatura média (de mistura) do fluido na saída
$T_{(r,0)}$	Distribuição de temperatura na seção transversal na entrada $x = 0$
$T_{(r,x)}$	Distribuição de temperatura na seção transversal na posição $x$
$T_{sup}$	Temperatura da parede (superfície)
$UV$	Espectrofotômetro ultra violeta
$u_M$	Velocidade média do fluido em escoamento
$v$	Volume específico
$V_{fb}$	Volume de fluido base
$V_{np}$	Volume de nanopartículas
$x$	Distância axial a partir da entrada da ST
$x_{cd,h}$	Comprimento de entrada hidrodinâmico
$x_{cd,h_{turb}}$	Comprimento de entrada hidrodinâmico para escoamento turbulento
$x_{cd,T}$	Comprimento de entrada térmico
$w_{np}$	Fração em massa (peso) de nanopartículas

## Letras Gregas

$\beta$	Razão entre a resistência Kapitza do fluido base e da nanopartícula $\beta = \frac{R_k k_{fb}}{R_2}$
$\delta$	Camada limite
$\delta_h$	Espessura da camada limite hidrodinâmica
$\delta_T$	Espessura da camada limite térmica
$\Delta P$	Perda de carga
$\Delta P/L$	Perda de carga por unidade de comprimento
$\Delta T_{e-s}$	Diferença de temperatura do fluido entre a entrada e a saída da ST
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido
$\pi$	Constante ( $\pi = 3,1416$ )
$\theta$	Ângulo Chiral (quiral)

$\theta$	Concentração volumétrica de nanopartículas
$\phi$	Concentração em massa de nanopartículas
$\psi$	Fator de forma da partícula
$\rho v$	Fluxo de massa do escoamento
$\rho$	Densidade do fluido
$\dot{V}$	Vazão volumétrica

## Subscritos

$cd,h$	entrada hidrodinâmica
$cd,T$	entrada térmica
$ef$	efetiva
$fb$	fluido base
$h$	hidrodinâmico
$M$	médio
$nf$	nanofluido
$np$	nanopartícula
$sr$	seção transversal
$T$	térmica

## Siglas

BNNTs	Nanotubos de Nitreto de Boro
CHIP	Circuito Integrado (CI, microchip, chip de silício, chip ou chipe)
CTAB	Cetyl Trymetil Ammonium Bromide - Dispersante (catiônico)
CVD	Chemical Vapor Deposition - Deposição de Vapor Químico
ENIAC	Electronic Numerical Integrator and Computer

HRTEM	Microscopia Eletrônica de transmissão de alta resolução (High-resolution transmission electron microscopy)
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada (International Union of Pure and Applied Chemistry)
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
TEM	Microscopia Eletrônica de Transmissão (Transmission electron microscopy)
MWCNTs	Nanotubos de carbono de parede multipla ( <i>Multi-walled carbon nanotubes</i> )
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet; Nd:Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
NFCs	Nanofibras de Carbono
NTCs	Nanotubos de carbono
PECVD	Plasma-enhanced chemical vapor deposition
PIBSI	Polyisobutylene Succinimide Dispersante
PLV	Vaporização por Laser Pulsado (PLV)
PVA	Polyvinyl Alcohol - Surfactante
RIE	Reativa-ion Etching - técnica de microfabricação
SANSS	Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System
SDS	Surfactante Dodecyl Sodium - Dispersante (aniônicos)
SEM	Microscopia eletrônica de varredura (Scanning electron microscopy)
ST	Seção de testes
SWCNTs	Nanotubos de carbono de parede simples ( <i>Single wall carbon nanotubes</i> )
THS	Transient Hot Strip - Tira quente transiente
TRITON X – 100	Dispersante (não iônico)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

## Unidades

Comprimento	$A^\circ$ <b>Angstron</b> $A^\circ = 10^{-10} m$
	$nm$ <b>Nanômetro</b> $nm = 10^{-9} m$
	$mm$ <b>Milímetro</b> $mm = 10^{-3} m$
	$m$ <b>Unidade de comprimento - SI - Metro</b>
	$\mu m$ <b>Micrômetro</b> $\mu m = 10^{-6} m$
	$pm$ <b>Picometro</b> - $1 nm = 10^{-10} m$
Temperatura	$K$ <b>Unidade de temperatura absoluta - Kelvin</b>
	$^\circ C$ <b>Unidade de temperatura - Celsius</b>
Massa Atômica	$u$ <b>Unidade de massa atômica</b>
Área Específica	$m^2/g$ <b>Área específica</b>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Organização do Trabalho . . . . .	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	Considerações Iniciais . . . . .	5
2.2	Nanociências e Nanotecnologias . . . . .	6
2.3	Nanomateriais: As Nanopartículas de Carbono . . . . .	9
2.3.1	Nanopartículas de carbono . . . . .	10
2.4	Nanotubos de Carbono . . . . .	18
2.4.1	Síntese de nanotubos de carbono . . . . .	21
2.4.2	Purificação de nanotubos de carbono . . . . .	26
2.4.3	Aplicação imediata para nanopartículas . . . . .	27
2.5	Nanofluido . . . . .	30
2.5.1	Preparação de nanofluidos . . . . .	33
2.5.2	Estabilidade de nanofluidos . . . . .	35
2.5.3	Propriedades termofísicas dos nanofluidos . . . . .	37
2.5.4	Transferência de calor por convecção de nanofluidos . . . . .	48
2.6	Nanofluidos de NTCs . . . . .	55
2.6.1	Preparação de nanofluidos de NTCs . . . . .	56
2.6.2	Viscosidade e condutividade térmica de nanofluidos de NTCs . . . . .	62
2.6.3	Transferência de calor por convecção de nanofluidos de NTCs . . . . .	68

<b>3 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>73</b>
3.1 Introdução . . . . .	73
3.2 O Equipamento Experimental . . . . .	74
3.2.1 Seção de teste . . . . .	74
3.2.2 Dispositivos de medição na seção de teste . . . . .	77
3.2.3 Circuitos termo-hidráulicos . . . . .	79
3.2.4 Componentes e instrumentação . . . . .	81
3.2.5 Sistema de aquisição e controle . . . . .	84
3.3 Avaliação do Equipamento Experimental . . . . .	89
3.3.1 Ensaios preliminares . . . . .	89
3.3.2 Verificação dos resultados . . . . .	92
3.3.3 Comparação dos resultados . . . . .	97
3.4 Tratamento dos Resultados Experimentais . . . . .	102
3.4.1 Avaliação das propriedades termofísicas do fluido . . . . .	103
3.4.2 Determinação do coeficiente de transferência de calor . . . . .	105
3.4.3 Cálculo da perda de carga . . . . .	107
3.5 Matriz de Experimentos . . . . .	107
3.6 Análise de Incertezas . . . . .	108
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>111</b>
4.1 Introdução . . . . .	111
4.2 Condições de Ensaio . . . . .	112
4.3 Amostras de Nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O . . . . .	114
4.3.1 Preparação das amostras de nanofluidos de NTCs/H <sub>2</sub> O . . . . .	114
4.3.2 Avaliação da estabilidade e homogeneidade . . . . .	118
4.4 Propriedades Termofísicas das Amostras . . . . .	121
4.4.1 Massa específica . . . . .	122
4.4.2 Calor específico . . . . .	123
4.4.3 Viscosidade . . . . .	125
4.4.4 Condutividade térmica . . . . .	128

4.5	Avaliação Termo-hidráulica . . . . .	133
4.5.1	Resultados Experimentais - Perda de Carga . . . . .	134
4.5.2	Resultados Experimentais - Transferência de Calor . . . . .	149
4.5.3	Resultados Experimentais - Efeito dos Parâmetros de Ensaio . . . . .	164
<b>5</b>	<b>ESTUDO DAS CORRELAÇÕES</b>	<b>169</b>
5.1	Introdução . . . . .	169
5.2	Propriedades Termofísicas de Nanofluidos . . . . .	170
5.2.1	Viscosidade . . . . .	171
5.2.2	Condutividade térmica . . . . .	174
5.3	Características Termo-hidráulicas . . . . .	177
5.3.1	Fator de atrito . . . . .	179
5.3.2	Coeficiente de transferência de calor . . . . .	181
5.4	Correlação para Número de Nusselt . . . . .	188
5.4.1	A corelação e alguns ensaios específicos . . . . .	192
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>197</b>
6.1	Conclusões . . . . .	197
6.2	Recomendações para Trabalhos Futuros . . . . .	200
6.3	Considerações Finais . . . . .	201



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

No momento em que a legislação ambiental, a escassez de recursos naturais, o desenvolvimento de sistemas de potência cada vez menores e a miniaturização eletrônica exigem sistemas energéticos mais eficientes, o desenvolvimento de novos fluidos de transferência de calor está sendo alvo de intensa pesquisa. O limitado desempenho térmico dos fluidos convencionais tem sido uma das principais barreiras no desenvolvimento de sistemas de troca de calor mais eficientes, de dimensões reduzidas e de menor custo construtivo e operacional. As técnicas tradicionais de melhoria da transferência de calor de sistemas térmicos já, praticamente, atingiram o limite de desenvolvimento no que se refere a intervenções no projeto, nos materiais, no controle e na automação. Com a crescente preocupação com a conservação de energia e a preservação do meio ambiente é importante que os trocadores de calor sejam projetados de forma otimizada, tendo como objetivo a redução de custos e operação eficiente, sem, entretanto, agredir o meio ambiente. Nesse sentido, as pesquisas estão sendo direcionadas para a intensificação da transferência de calor por intermédio do desenvolvimento de fluidos que incrementem a transferência de calor sem penalizar, excessivamente, o consumo de energia pelo bombeamento.

Com o advento da nanotecnologia, a capacidade de sintetizar partículas sólidas de tamanho nanométrico, tornou-se realidade com potencial e imediata aplicação das nanopartículas suspensas em fluido térmico com o objetivo de incrementar a troca de calor. Apesar do número

crescente de publicações a respeito das características termo-hidráulicas de nanofluidos, a real aplicação desta nova classe de fluido de trabalho requer grandes esforços de pesquisa. Mesmo que estudos recentes tenham empregado ferramental tecnologicamente mais adequado, alguns resultados ainda são inconsistentes e, como regra geral, se restringem a correlacionar resultados experimentais específicos. Assim, os nanofluidos constituem uma oportunidade para pesquisa em diferentes áreas e sob as mais variadas abordagens. Diante do exposto, este trabalho pretende avaliar, experimentalmente, o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono à base de água destilada (NTCs/H<sub>2</sub>O) em escoamento monofásico no interior de tubos circulares horizontais.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho centrou-se no projeto, construção e calibração de uma bancada experimental com vistas à avaliação do comportamento térmico e hidráulico de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O e determinar, experimentalmente, seu coeficiente de transferência de calor por convecção e a perda de carga para escoamento monofásico no interior de um tubo circular horizontal em regime de fluxo turbulento.

A partir de uma revisão bibliográfica abrangente e de resultados experimentais consistentes, o presente trabalho apresenta uma visão geral do comportamento termo-hidráulico de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O em escoamento monofásico turbulento. Nesse sentido, os objetivos específicos do presente estudo podem ser assim enumerados:

- \* Apresentar uma visão geral do estado da arte sobre nanofluidos, especialmente na área de preparação e caracterização termofísica de nanofluidos;
- \* Avaliar experimentalmente o efeito dos principais parâmetros físicos (velocidade mássica, fluxo específico de calor pela parede do tubo da seção de teste e temperatura de entrada do fluido na seção de teste) sobre o coeficiente de transferência de calor e perda de carga no escoamento de diferentes amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O em tubo circular reto e horizontal;
- \* Verificar o efeito da concentração, razão de aspecto e natureza dos nanotubos de carbono

utilizados na preparação das amostras sobre o coeficiente de transferência de calor e sobre a perda de carga;

- \* Comparar os resultados experimentais de transferência de calor e perda de carga das amostras de nanofluido com os resultados experimentais levantados para o fluido base (água destilada);
- \* Analisar a potencialidade da aplicação das amostras de nanofluido como técnica de intensificação da transferência de calor.

### **1.3 Organização do Trabalho**

O presente trabalho baseia-se no estudo dos mecanismos de transferência de calor de fluidos em escoamento monofásico no interior de tubos horizontais e será composto, além desta introdução, de outros 5 capítulos, cada um subdividido em seções e subseções.

No capítulo 2, será abordado o tema da nanotecnologia, seus desdobramentos e perspectivas, incluindo um breve estudo das nanopartículas de carbono, sua síntese, caracterização e potenciais aplicações, mais especificamente, em nanofluidos. Neste capítulo procede-se também uma revisão bibliográfica abrangente sobre nanofluidos, ao longo da qual, será apresentado o estado da arte em relação às propriedades termofísicas dos nanofluidos e seu desempenho térmico superior aos fluidos convencionais.

No capítulo 3 será relatada a construção da bancada experimental, a descrição do funcionamento do aparato, o processo de calibração e as considerações teóricas sobre transferência de calor que nortearam o projeto da mesma. Este capítulo também será utilizado para apresentar a análise dos resultados levantados para o fluido base considerando aqueles parâmetros monitorados nos experimentos, isto é, a vazão mássica do escoamento, o fluxo de calor fornecido e a temperatura do fluido na entrada da seção de teste.

No capítulo 4, procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos. A análise será feita prioritariamente por intermédio da comparação dos dados levantados para a água com aqueles resultantes dos ensaios realizados com as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O nas mesmas condições nominais. Também é parâmetro de referência o tipo de fluido, principalmente

no que diz respeito à concentração em volume de nanopartículas em suspensão no fluido base e as características dos nanotubos de carbono utilizados no preparo das dispersões.

Uma vez que, os modelos são imagens que facilitam a compreensão de algo desconhecido, o capítulo 5 deste trabalho é, especialmente, dedicado à comparação dos resultados experimentais, levantados nesta pesquisa, com aqueles previstos a partir de modelos pertinentes publicados na literatura. E, mais importante, uma vez que cabe aos resultados dos experimentos permitirem que se atribua as incógnitas os valores cabíveis, a comparação dos resultados experimentais com aqueles previstos pelos modelos servirá para avaliar a precisão dos mesmos quando aplicados aos nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Este capítulo traz, ainda, a apresentação de uma correlação proposta para o coeficiente de transferência de calor, baseada nos resultados experimentais do presente trabalho.

No último capítulo serão apresentadas as principais conclusões decorrentes da realização deste trabalho, assim como a apresentação dos possíveis desdobramentos para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo contempla a extensa pesquisa bibliográfica realizada ao longo do desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, será apresentada uma seção dedicada aos termos nanociência e nanotecnologia que, em essência, aborda o histórico do desenvolvimento das nanotecnologias, as definições, seus desdobramentos e perspectivas. Na sequência, aparece uma seção dedicada aos nanomateriais, mormente aqueles associados às formas alotrópicas moleculares do carbono. A seção seguinte contempla, especialmente, os nanotubos de carbono, objeto da presente pesquisa. A quarta seção da revisão bibliográfica, trata dos nanofluidos, abordando a definição de nanofluido como uma nova classe de fluido de trabalho em sistemas de transferência de calor. A referida seção aborda, ainda, as pesquisas relacionadas ao tema e as principais técnicas utilizadas para a preparação, avaliação da estabilidade e homogeneidade das dispersões, além da caracterização dos nanofluidos quanto às suas propriedades termofísicas, em especial, a massa específica, o calor específico, a viscosidade e a condutividade térmica. Finalmente, a última parte deste capítulo é dedicada à revisão dos trabalhos relacionados à transferência de calor e a perda de carga no escoamento de nanofluidos.

## 2.2 Nanociências e Nanotecnologias

A nanociência e as nanotecnologias contemplam o mundo nanométrico, no qual a dimensão física é representada por uma unidade equivalente ao bilionésimo do metro, expressa pelo prefixo nano (do grego: anão/nanico). Para que a bilionésima parte do metro ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) seja facilmente entendida e se tenha idéia da real dimensão, é interessante, então, comparar com um fio de cabelo humano, que possui entre 50.000 e 100.000 nanômetros de diâmetro.

A manipulação de átomos e moléculas em laboratórios já é uma realidade e gera perspectivas fantásticas em diversas áreas do conhecimento, tais como: novos materiais, novos medicamentos, novas técnicas para a cura de doenças, a solução para problemas energéticos e de escassez de matéria prima e a preservação ambiental.

A nanotecnologia está associada a diversas áreas de pesquisa e produção na escala atômica. O princípio básico da nanotecnologia é a construção de estruturas e novos materiais a partir de átomos e/ou moléculas. Feynman<sup>1</sup> (1918 - 1988), pioneiro na área de computação quântica, introduziu o conceito de nanotecnologia no encontro anual da Sociedade Americana de Física, em sua palestra sobre o controle e manipulação da matéria em escala atômica. No entanto, a palavra nanotecnologia foi utilizada pela primeira vez por Taniguchi<sup>2</sup> (1912-1999), em 1974, para descrever as tecnologias e ferramentas que permitem a construção de materiais com precisão em uma escala de 1 nm. Drexler<sup>3</sup> (1955) popularizou o termo, na década de 80, com a publicação do livro *Engines of Creation*<sup>4</sup>.

A nanotecnologia Drexleriana é aquilo a que agora se chama nanotecnologia molecular e que pressupõe a construção átomo a átomo de dispositivos úteis à vida humana.

Não se está acostumado à ideia de manipular átomos e moléculas, eles não podem ser tocados nem vistos um a um. A experiência comum jamais trabalha com esses objetos unitariamente.

---

<sup>1</sup>Richard Philips Feynman (1918 - 1988): Nobel de física (1965) *There's plenty of room at the bottom*, seu discurso na American Phisical Society, em Pasadena, EUA, no ano de 1959.

<sup>2</sup>Norio Taniguchi (1912-1999): Professor da *Tokyo Science University* usou o termo nanotecnologua para descrever a tecnologia de produção para obter grande precisão e materiais ultra-finos.

<sup>3</sup>Kim Eric Drexler(1955): Teorizou sobre a possibilidade de se construir nanomáquinas inteligentes. O planejamento molecular dos materiais poderia levar a uma nova tecnologia baseada em máquinas construtoras do tamanho de moléculas.

<sup>4</sup>Engines of Creation: The coming Era of Nanotecnology (Motores da Criação): Livro de Kim Eric Drexler que popularizou o termo nanotecnologia e ressucitou o discurso de Richard Philips Feynman para apoiar suas idéias. The coming Era of Nanotecnology, Nova York, anchor Books, 1986.

Quase duas décadas depois de Feynman ter sugerido a possibilidade de se manipular individualmente os átomos, é que o desenvolvimento da microscopia eletrônica tornou possível tal idealização (de uma maneira geral esses microscópios mapeiam objetos de dimensões nanométricas por meio de uma agulha (sonda) muito fina, construindo uma imagem com resolução em escala atômica, tornando possível o manuseio de átomos individuais).

Segundo Joachin e Plévert (2009), já em 1950 os microscópios eletrônicos forneciam imagens de átomos numa tela fosforescente, entretanto o microscópio de tunelamento inventado em 1981 foi o primeiro instrumento que, além de formar a imagem de um único átomo ou de uma única molécula numa tela de computador, permitiu igualmente tocar com sua ponta, um único átomo de cada vez, e ao mesmo tempo deslocá-lo.

Atualmente, a nanotecnologia vem sendo considerada a próxima revolução tecnológica, podendo vir a ser uma transformação com impactos imprevisíveis no âmbito mundial. As possibilidades que se abrem nesse âmbito do conhecimento são tantas que são estimados mercados com um alcance de trilhões de dólares nos próximos anos. A definição de nanotecnologia como uma tecnologia que preserva os recursos materiais surge da transformação da relação do homem com a matéria provocada pela invenção do microscópio de tunelamento que, como ferramenta, dá origem a uma abordagem diferente, que consiste em construir, átomo a átomo, estruturas cada vez maiores, isto é, uma abordagem ascendente (monumentalização). Para Joachin e Plévert (2009), a elasticidade da definição de *nanotecnologias* já não diz respeito apenas à manipulação da matéria átomo a átomo, mas faz referências a todas as técnicas que permitem a fabricação de *objetos pequenos* com precisão da ordem do nanômetro, mesmo quando põem em jogo bilhões de átomos e não mais alguns poucos. As nanotecnologias de hoje, que utilizam os mesmos princípios tecnológicos de antes da invenção do microscópio de transmissão, impelem a miniaturização (uma abordagem de cima para baixo) a seu extremo.

A proposta inicial da nanotecnologia surgiu, nos anos 1980, bastante promissora para aqueles que vislumbravam reduzir a quantidade de energia e matéria consumidas para produzirmos nossas máquinas. No entanto, de acordo com Joachin e Plévert (2009), ainda hoje centenas de diferentes moléculas são produzidas diariamente nos laboratórios, mas são fabricadas aos bilhões (como exemplo, uma gota d'água contém mais de 1500 bilhões de bilhões de moléculas), enquanto a molécula fabricada sob a ponta do microscópio de tunelamento constitui um exemplar único.

Segundo Joachin e Plévert (2009), forças políticas e a competitividade da indústria eletrônica japonesa e coreana fizeram com que se proclamassem as *nanotecnologias* (não aquelas da manipulação átomo a átomo, do desenvolvimento sustentável, menos agressiva ao meio ambiente) eram cruciais para o futuro imediato da microeletrônica, da indústria química e farmacêutica americana e não para o desenvolvimento sustentável do planeta. A abordagem tecnológica de *cima para baixo*, isto é, o caminho da miniaturização que englobava toda e qualquer indústria que se reportasse à escala do nanômetro era o único caminho válido.

A nanotecnologia, redefinida, cobre agora toda ciência dos materiais, novos combustíveis e biotecnologias e, de tão amplamente desdoblada, abre um fosso entre técnicas e domínios bastante diversos (monumentalização × miniaturização). A nanotecnologia consiste na produção e aplicação de estruturas, dispositivos e sistemas controlando a forma e o tamanho na escala nanometrica. Assim, para Joachin e Plévert (2009), é desta grande abrangência que derivam outras definições, tais como; *As nanotecnologias começam quando fenômenos físicos novos aparecem em amostras de tamanho inferior a 100 nm em pelo menos uma direção*, que é a definição adotada pela Royal Society e Royal Academy of Engineering - Grã-bretanha.

O primeiro computador, conhecido como ENIAC, construído em 1946, pesava cerca de 30 toneladas e ocupava todo o andar de um edifício, mas já em 1947, William Shockley<sup>5</sup> (1910 - 1989), Walter Brattain<sup>6</sup> (1902 - 1987) e John Bardeen<sup>7</sup> (1908 - 1991) apresentaram o protótipo do primeiro transistor que, pouco a pouco, foi se miniaturizando e substituindo as válvulas eletrônicas.

Em 1965, Gordon Moore<sup>8</sup> (1929 - ) já afirmava que era possível integrar 60 componentes eletrônicos em um único CHIP. Nos processadores modernos, o número de transistores integrados em um único e complexo sistema é da ordem de bilhões. Atingiu-se a plenitude da era do silício e a muito rompeu-se o limite da escala micrométrica.

Segundo Toma (2009), o desenvolvimento da microtecnologia, principalmente através da microeletrônica e da computação, foi fator decisivo na passagem para a modernidade, pressi-

---

<sup>5</sup>William Bradford Shockley Jr. (1910 - 1989): Nobel em Física (1956), Físico, inventor e professor na Universidade de Stanford.

<sup>6</sup>Walter Houser Brattain (1902 - 1987): Nobel de Física (1956), Físico da Bell Labs.

<sup>7</sup>John Bardeen (1908 - 1991): Nobel de Física (1956 /1972), Físico e engenheiro elétrico, apareceu na revista Life's lista dos 100 Americanos Mais Influentes do Século.

<sup>8</sup>Gordon Earle Moore (1929 - ): Engenheiro, Co-fundador da Intel Corporation, autor da Lei de Moore (publicada na Electronics Magazine em um artigo de 19 de Abril de 1965).

onou os demais setores da ciência e tecnologia e promoveu a elevação dos padrões de qualidade e expectativa de vida no mundo inteiro, a despeito das incongruências da sociedade moderna. Além disso, de acordo com o autor, atualmente presencia-se a transição do universo micrométrico para o nanométrico.

Para Toma (2009), essa transição é considerada por muitos cientistas como uma quebra de paradigmas, pela abrangência e pela questão filosófica. Pela abrangência, pois átomos, moléculas e compostos tornam-se objeto de interesse de todas as ciências - no universo nanométrico todas as ciências se encontram. Pela questão filosófica, pois no universo nanométrico fica ainda mais desafiante trabalhar com questões de espaço e tempo, energia e matéria.

A segunda metade do século XX foi marcada pela revolução dos microchips, microcâmeras, microsistemas e muitas outras miniaturizações. Entretanto, no final desse mesmo século, materiais cujo prefixo corresponde a uma escala mil vezes menor começaram a surgir, dando início a um novo segmento no mundo científico, conhecido como nanociência. Apesar de imperceptíveis ao olho nu, esses materiais já ocupam um espaço cada vez maior no cotidiano da população, com aplicações na indústria têxtil, em métodos alternativos de produção de energia, na medicina e, até mesmo, em pinturas automobilísticas e aeronáuticas. Nesse contexto, a nanociência é designada como o estudo da propriedade da matéria que possui uma escala de comprimento entre 1 e 100 nm e, nanotecnologia, como o conjunto de procedimentos para a manipulação da matéria nessa escala.

### **2.3 Nanomateriais: As Nanopartículas de Carbono**

Um grande número de pesquisadores orienta suas pesquisas para nanomateriais. Esse termo deriva da expressão, *materiais estruturados em escala nanométrica*, e designa os materiais cuja estrutura elementar é constituída de moléculas, macromoléculas ou agregados de átomos, cujas dimensões são nanométricas. Um exemplo de material atomicamente estruturado é o cloreto de sódio (sal de cozinha), cujo arranjo básico é composto de um átomo de cloro ( $Cl$ ) e um átomo de sódio ( $Na$ ) distantes em cerca de 0,3 nanômetros. Esse arranjo repete-se no espaço para criar um pequeno cristal, que pode ser observado com uma lupa.

Um nanomaterial tem seu arranjo básico constituído por uma molécula que pode ser

complexa e conferir ao material propriedades particulares importantíssimas, tais como a resistência às deformações, capacidade de gravar informações, etc. Essa propriedade só aparece quando milhões de moléculas idênticas são agregadas. Acontece o mesmo com as nanopartículas, com dimensão de apenas alguns nanômetros de diâmetro, mas são compostas por um conglomerado de milhões de átomos. Segundo Joachin e Plévert (2009), Sáez Acuña (2009) e Ferreira (2010), o grande fascínio que motiva o desenvolvimento da nanociência relaciona-se com o fato de que materiais na escala nanométrica, muitas vezes, apresentam comportamentos completamente diferentes, originais e desconhecidos. Fora dos conglomerados macroscópicos, os efeitos quânticos tornam-se mais pronunciados, produzindo novas propriedades, e os elementos químicos começam a expor outros padrões de reatividade. Um exemplo bastante comum é o alumínio, que na forma de nanopartículas entra em combustão em contato com o oxigênio.

### 2.3.1 *Nanopartículas de carbono*

O interesse em materiais em escala nanométrica vem crescendo de forma extraordinária devido ao seu potencial de aplicação em diversas áreas científicas e tecnológicas. O aprimoramento das técnicas experimentais, o desenvolvimento de computadores mais potentes e as novas técnicas de microscopia eletrônica têm permitido aos pesquisadores, teóricos e experimentais, trabalharem a nível molecular ou átomo a átomo de forma a criar estruturas complexas com rigoroso controle de sua organização estrutural, o que tem levado a uma capacidade de manipulação e entendimento da matéria sem precedentes.

Conforme Sáez Acuña (2009), atualmente, pode-se dizer que a nanociência é composta por diferentes segmentos, onde cada um contribui de maneira efetiva para o desenvolvimento dos outros. Entre esses segmentos encontra-se a nanotecnologia do carbono, que apresenta um destaque cada vez maior. A nanotecnologia do carbono é um segmento da ciência que estuda a manipulação de estruturas de carbono com pelo menos uma dimensão entre 1 e 100 nanômetros. Dessa forma, as seções a seguir têm como objetivo apresentar alguns dos principais tópicos dessa área, que vão desde as diversas estruturas que o carbono pode formar com suas quatro valências, até as aplicações que estão sendo desenvolvidas com as nanoestruturas do carbono. Para isso, é interessante começar conhecendo as formas alotrópicas do carbono.

## Formas alotrópicas do carbono

Representado pelo símbolo *C*, o carbono (do latim: carbo/carvão) tem número atômico 6 (6 prótons e 6 elétrons), massa molecular 12 e é sólido a temperatura ambiente. Dependendo das condições de formação pode ser encontrado na natureza em diversas formas alotrópicas, carbono amorfó e cristalino em forma de grafite ou diamante. Pertencente ao grupo (ou família) 14 da tabela periódica (*G14*), carbono é o pilar básico da química orgânica, está presente em cerca de 10 milhões de compostos de carbono e forma parte de todos os seres vivos.

O *C* é um elemento notável por várias razões, suas formas alotrópicas incluem, surpreendentemente, uma das substâncias mais frágeis e de baixo custo (o grafite) e uma das mais duras e caras (o diamante). Mais ainda, apresenta uma grande afinidade para combinar-se quimicamente com outros átomos pequenos, incluindo os próprios átomos de carbono que podem formar largas cadeias. O seu pequeno raio atômico permite-lhe formar cadeias múltiplas.

Localizado no topo da coluna do *G14* da tabela, o carbono, *C*, é o menos metálico do grupo, pois o caráter metálico é maior na base da coluna da tabela periódica e assim, o carbono apresenta propriedades não metálicas bem definidas. Forma compostos covalentes com os não-metais e compostos iônicos com os metais. As propriedades dos elementos do *G14* tornam possíveis os dois tipos de inteligência, especialmente o *C* e o *Si*, este largamente utilizado na computação e aquele por fazer parte de todos os organismos vivos.

Ao ocupar o topo da coluna do *G14*, a expectativa é que o *C* apresente algumas diferenças com relação aos outros elementos do grupo. Algumas diferenças existentes neste e em outros grupos da tabela periódica, aparecem aqui de forma muito mais acentuada. O pequeno raio atômico do *C* (67 – 70 pm) seria o responsável pela grande ocorrência de ligações *C = C* (Carbono-Carbono) e *C = O* (Carbono-Oxigênio). Atribui-se a presença de propriedades especiais ao fato de a camada de valência desse elemento ser semi-preenchida e isso estabelece a linha divisória entre os metais e não-metais.

Todos os elementos do *G14* têm configuração dos elétrons de valência do tipo  $ns^2, np^2$  de modo que todos os 4 elétrons dos elementos leves estão igualmente disponíveis para formar ligações. Outra característica importante é que o *C* é o único elemento do *G14* que normalmente forma ligações múltiplas com ele mesmo.

Segundo a definição da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry* - União Internacional de Química Pura e Aplicada), alótropos são diferentes modificações estruturais de um elemento. Esse termo refere-se à propriedade que determinados elementos apresentam de existirem em diferentes formas, chamadas de formas alotrópicas, que variam em função de como os átomos desse elemento estão ligados entre si.

Inúmeros elementos apresentam formas alotrópicas diferentes, entre eles: o nitrogênio ( $N$ ), o silício ( $Si$ ), o boro ( $B$ ), o enxofre ( $S$ ) e alguns metais como o ferro ( $Fe$ ) e o titânio ( $Ti$ ). O oxigênio pode ser encontrado na forma de  $O_2$ , um gás incolor, essencial para a existência da vida em nosso planeta e que compõe cerca de 23% do ar atmosférico, na forma de  $O_3$ , o ozônio, que forma uma camada gasosa na estratosfera, protegendo o planeta de grande parte da radiação ultravioleta emitida pelo sol, e pode, ainda, ser encontrado na forma de tetra-oxigênio,  $O_4$ , muito pouco estável e octa-oxigênio,  $O_8$ , um sólido vermelho.

No caso do carbono, até 1985, apenas três formas alotrópicas eram conhecidas, as de ocorrência natural, sendo elas o grafite, o diamante e o carbono amorf. Atualmente, além destas, também são conhecidas as forma alotrópicas moleculares do carbono, ou seja, os fulerenos e os nanotubos de carbono. O grafeno, recentemente passou a ocupar um lugar de destaque na química do carbono, mas, essa estrutura não é considerada uma forma alotrópica, como as que são descritas a seguir.

### a) Carbono Amorfo

Apesar de conhecido desde tempos remotos, o carbono amorf só foi considerado uma forma alotrópica recentemente. A fuligem e o carbono negro contém cristais muito pequenos de grafite. O carbono negro é produzido pelo aquecimento de hidrocarbonetos gasosos até cerca de  $1000^{\circ}C$  na ausência de ar, e é aplicado para reforçar borrachas, para pigmentos e tinta de impressão. O carbono ativo (carvão ativado) consiste de grânulos de carbono monocristalino e é produzido pelo aquecimento de lixo orgânico na ausência de ar e, posteriormente, processado para aumentar sua porosidade o que aumenta sua área superficial (cerca de  $2000\ m^2/g$  - área específica da superfície) tornando-o indicado para remoção de impurezas orgânicas de líquidos e gases pelo processo de adsorção. Sua maior aplicação ocorre nas estações de tratamento de água para remover compostos orgânicos de água potável, mas é também utilizado em purificadores de

ar, máscaras contra gases, desodorizadores e em filtros de água de aquários.

A forma amorfá é essencialmente grafite, porém não chega a adotar uma estrutura cristalina macroscópica. Esta é a forma presente na maioria dos carvões e na fuligem. A fase amorfá é caracterizada pela ausência de ordem de longo alcance na estrutura cristalina, com átomos em várias coordenações. Por esta razão, os átomos não estão idealmente ligados quimicamente, introduzindo componentes de stress e distorções bastante significativas, fazendo desta uma estrutura energeticamente desfavorável em relação aos alótropos de carbono. Apesar das dificuldades de se estudar as propriedades de sistemas amorfos, do ponto de vista teórico, estes materiais possuem grande interesse tecnológico e industrial como, por exemplo, sua aplicação em células de combustível e pigmentos. O que justifica o esforço, cada vez maior, que tem sido realizado para conhecer sua estrutura e suas propriedades. As fibras de carbono, por exemplo, são compostos amorfos com estrutura baseada no grafite. Podem ser sintetizadas em uma ampla variedade de morfologias e diâmetros que podem variar de 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ . As características das ligações entre carbonos nos planos, associados aos defeitos e dobras destes, e que impedem o deslizamento de uma camada sobre a outra e garante resistência a tensão comparável ao aço é que justificam o grande interesse industrial nas fibras de carbono.

### b) Carbono Grafite

Segundo Atkins (2001), das formas alotrópicas, o grafite é a forma termodinamicamente mais estável em temperatura ambiente e a pressão atmosférica. Em condições de pressão normal, o carbono adota a forma de grafite, onde cada átomo está unido a outros três em um plano composto de células hexagonais. Neste estado, 3 elétrons se encontram em orbitais híbridos planos  $sp^2$  e o quarto em um orbital  $p$  (Fig. 2.1(b)).

Devido à mobilidade dos elétrons nas fracas ligações entre os orbitais, o grafite é condutor de eletricidade, propriedade que permite seu uso em processos de eletrólise. O material é frágil e as diferentes camadas, separadas por átomos intercalados, se encontram unidas por forças de Van der Waals, sendo relativamente fácil que umas deslizem sobre as outras. Cada uma dessas camadas, consistindo em uma folha planar de átomos de carbono densamente compactados em uma grade de duas dimensões, é hoje conhecida como grafeno, termo proposto por Hanns-Peter Boehm<sup>9</sup> em 1962.

<sup>9</sup>Hanns-Peter Boehm (1928): Químico e professor emérito na Ludwig-Maximilians-Universität de Mu-

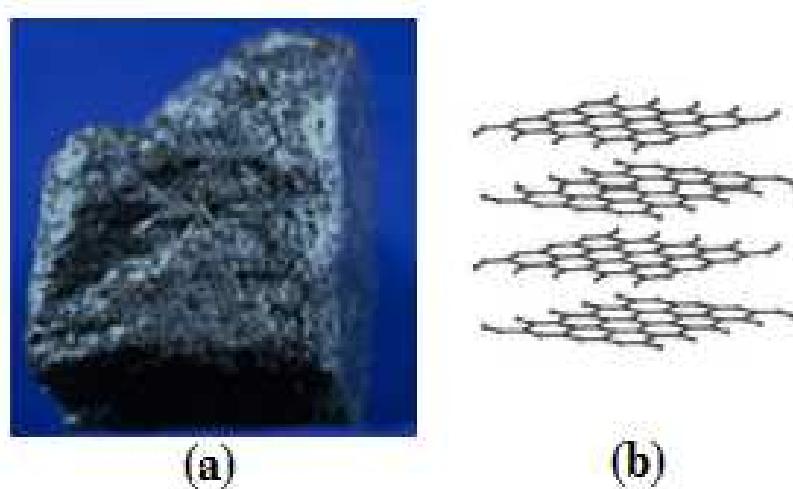


Figura 2.1 – Amostra de grafite (a); esquema do arranjo estrutural (b) - Adaptada.

O grafeno foi oficialmente definido na literatura química em 1994 pela IUPAC como: uma única camada da estrutura grafítica que pode ser considerada como o último membro da série de naftalenos, antracenos, coronenos, etc., e o termo grafeno deve, portanto, ser utilizado para designar a camada individual de carbono em compostos de intercalação de grafite. O uso do termo, camada de grafeno, é também considerado para a terminologia geral dos carbonos. As folhas planares de átomos de carbono ligados em anéis hexagonais são ingredientes para materiais de grafite de outras dimensões, como fulerenos (0D), nanotubos (1D) ou grafite (3D).

### c) Carbono Diamante

Sob pressões elevadas, o carbono adota a forma de diamante, no qual cada átomo está unido a outros quatro átomos de carbono, encontrando-se os 4 elétrons em orbitais  $sp^3$ , como nos hidrocarbonetos. Cada átomo de carbono forma fortes ligações simples ( $C - C$ ) com quatro outros átomos de carbono tetra-coordenados, constituindo um modelo cristalino tridimensional (Fig. 2.2). Essa estrutura confere ao diamante uma dureza extrema, propriedades isolantes, elevado ponto de fusão e massa específica maior que a do grafite. Sua reatividade química, devido à sua estrutura compacta de ligações  $C - C$ , é muito menor do que a do grafite ou a do carbono amorfó.

O diamante apresenta a mesma estrutura cúbica que o silício e, devido à elevada resistência da ligação química carbono-carbono ( $C - C$ ), é a substância mais dura conhecida. A

rique, Alemanha. Pioneiro na pesquisa do grafeno. Identificou simples folhas de grafeno por meio de microscopia eletrônica de transmissão (MET) e difração de raios X em 1961.

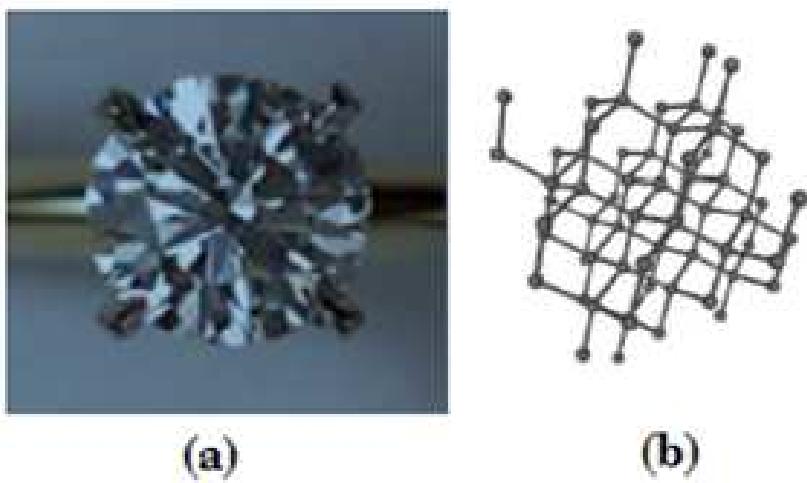


Figura 2.2 – Amostra de diamante (a); esquema do arranjo estrutural (b) - Adaptada.

transformação em grafite na temperatura ambiente é tão lenta que não é possível detectar. Sob certas condições, o carbono cristaliza-se como lonsdaleíta, que é uma forma similar ao diamante, porém hexagonal, encontrada nos meteoros.

Os diamantes sintéticos são feitos sob condições de alta pressão e temperatura, ou mais comumente, pela decomposição térmica do metano ( $CH_4$ ) que é um processo no qual os átomos de carbono depositam-se em uma base fria na forma de grafite e diamante, entretanto, os átomos de hidrogênio,  $H$ , produzidos na decomposição reagem rapidamente com o grafite formando hidrocarbonetos voláteis,  $HC$ , e, assim, mais diamante sobrevive no processo.

#### d) Fulerenos

Do ponto de vista químico, o carbono apresenta grande versatilidade e um grande número de configurações e diferentes compostos podem ser formados, o que justifica o constante interesse em seu estudo. E nesse contexto foi que, em 1985, o grupo de Harold Kroto<sup>10</sup>, que estava estudando a síntese de grandes cadeias carbônicas que apresentassem um espectro de absorção semelhante ao observado na poeira interestelar, tiveram a ideia de tentar reproduzir a atmosfera estelar usando a técnica de vaporização a laser do grafite em uma atmosfera controlada,

<sup>10</sup>Harold (Harry) Walter Kroto (1939): Químico; seu estudo de doutorado incluiu uma pesquisa inédita sobre subóxide carbono,  $O = C = C = C = O$ , e isso levou a um interesse geral em moléculas contendo cadeias de átomos de carbono com numerosas ligações múltiplas. Lançou um programa de pesquisa para procurar grandes cadeias de carbono no meio interestelar. Estudos anteriores haviam detectado a molécula cyanoacetylene,  $HC = CC = N$ . O grupo de Kroto buscou evidência espectral de mais moléculas semelhantes, como cyanobutadiyne,  $HC = CC = CC = N$  e cyanoheptatriyne,  $HC = CC = CC = CC = N$ , e tentando explicar levou à descoberta da molécula  $C_{60}$  (buckminsterfulereno).

de alta temperatura e baixa pressão e, demonstraram a existência de uma nova família de formas elementares de carbono, os fulerenos, dando início a uma nova era na ciência do carbono (KROTO ET AL, 1985).

Os fulerenos são compostos contendo carbonos hibridizados, porém, não de uma forma linear como no grafite, mas sim de uma forma distorcida, de maneira que os diversos carbonos se inclinem sobre si mesmos e formem uma superfície fechada, ao contrário da superfície aberta do grafite. O exemplo mais conhecido é o fulereno *buckyball* ( $C_{60}$ ), essa molécula contém 60 átomos de carbono em um arranjo semelhante a uma bola de futebol, com 20 hexágonos e 12 pentágonos.

O nome do  $C_{60}$  deriva de uma homenagem dos pesquisadores ao arquiteto Richard Buckminster Fuller<sup>11</sup> idealizador dos domos geodésicos que deram forma ao pavilhão da Exposição Mundial de 1967, realizada na Ilha de Santa Helena, no Canadá (EXPO 67) (Fig. 2.3).

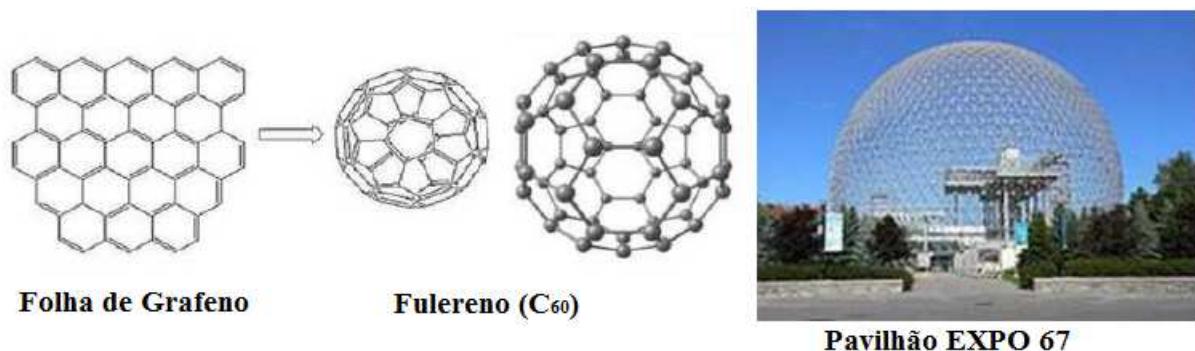


Figura 2.3 – Esquema da configuração estrutural do fulereno ( $C_{60}$ ) e Pavilhão da EXPO 67 - Adaptada.

### e) Nanotubos de Carbono

Em 1985, Kroto, Smalley e Curl<sup>12</sup> descobriram os fulerenos. Seis anos mais tarde, em 1991, os nanotubos de carbono (NTCs) foram descobertos por Sumio Iijima<sup>13</sup> na fuligem

<sup>11</sup>Richard Buckminster Fuller (1895 - 1983): considerado um visionário, designer, arquitecto, inventor e escritor. Os conceitos geométricos estudados por Fuller, entretanto, têm sobrevivido ao seu criador de forma inesperada: a estrutura biológica dos vírus, dos quasi-cristais e dos buckminsterfullerenes (a terceira forma alótropa do carbono puro, além do diamante e da grafite, excluindo o carvão, que é amorfo) demonstram bem que Buckminster soube interpretar os fundamentos geométricos da natureza, para além do que, talvez ele mesmo pudesse predizer.

<sup>12</sup>Harold Walter Kroto, Richard Errett Smalley e Robert Floyd Curl, Jr.: Ganhadores, em 1996, do Prêmio Nobel de Química pela descoberta dos fulerenos.

<sup>13</sup>Sumio Iijima (1939): Físico, ganhador da medalha Benjamin Franklin em Física, em 2002, por seu trabalho com nanotubos de carbono.

resultante do processo de síntese do fulereno (JOACHIN E PLÉVERT, 2009). Foi produto de um método de descarga de arco de carbono, que é semelhante ao o método utilizado para a preparação de fulerenos. Nesta forma, o carbono é organizado em estruturas tubulares em um nível nanoscópico. A formação de cilindros concêntricos (dois ou mais), com espaçamento de  $0,34\text{ nm}$ , diâmetro externo da ordem de  $4 - 30\text{ nm}$ , diâmetro do cilindro mais interno da ordem de  $2,2\text{ nm}$  e comprimentos de até  $1\text{ }\mu\text{m}$  (Fig. 2.4).

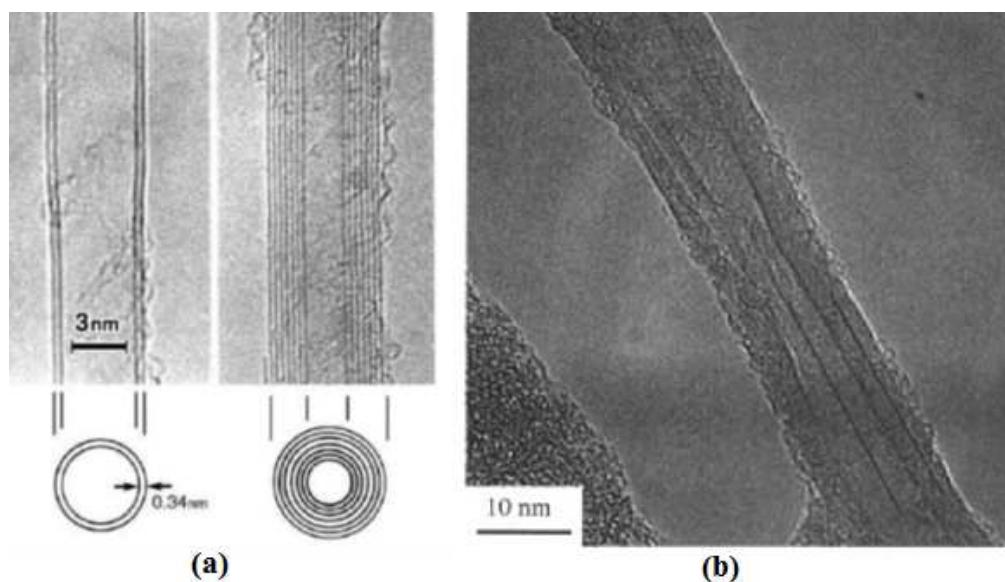


Figura 2.4 – Nanotubos de carbono de parede dupla e nanotubo de carbono de paredes multiplas (a) - (IIJIMA, 1991); Imagem de microscópio eletrônico de transmissão (TEM) de um nanotubo de carbono de paredes múltiplas (b) - (ZENG ET AL, 2006).

Os primeiros nanotubos de carbono observados foram aqueles denominados nanotubos de carbono de paredes múltiplas - MWCNTs (*Multi-walled carbon nanotubes*), e aproximadamente dois anos depois, Iijima e Ichihashi publicaram *Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter*, onde é demonstrada a síntese de nanotubos de carbono de parede simples - SWCNTs (*Single wall carbon nanotubes*). A descoberta dos SWCNTs representou uma grande evolução com relação aos similares MWCNTs (*multiwalled carbon nanotubes*), sugerindo aplicações tecnológicas e possibilidades de especulações teóricas excepcionais devido, principalmente, ao seu comportamento eletrônico único.

Conforme descrito anteriormente, atualmente, além do carbono amorfó, grafite e diamante, encontram-se as formas alotrópicas moleculares do carbono. Este campo continua sendo largamente explorado e existe a possibilidade de ser criado um novo campo para a química do carbono, com o objetivo de organizar o estudo dessas novas estruturas.

## 2.4 Nanotubos de Carbono

Desde a descoberta dos NTCs, os mesmos têm sido foco de intensa pesquisa, devido às suas excelentes propriedades e amplo potencial de impacto nas áreas de ciência e tecnologia. Segundo Zeng et al. (2006), os nanotubos de carbono oferecem enormes oportunidades fundamentais para o desenvolvimento de novos sistemas e materiais, uma vez que possuem propriedades eletrônicas únicas, apresentam uma condutividade térmica maior do que a do diamante e possuem propriedades mecânicas, como rigidez, força e resistência, que ultrapassam as de qualquer material utilizado atualmente.

Dada as incríveis propriedades e potenciais aplicações dos NTCs, alguns países, como Estados Unidos, Japão, Alemanha e China, criaram instituições de pesquisa para o estudo de nanotubos de carbono, o que acelerou a evolução dos processos de síntese, purificação, caracterização e funcionalização de nanotubos de carbono, e alguns progressos foram alcançados na aplicação de NTCs em diferentes áreas da ciência e tecnologia.

Os nanotubos de carbono são considerados como folhas de grafeno enroladas e podem ser nanotubos de carbono de parede simples ou nanotubos de paredes múltiplas. Os nanotubos de carbono de parede simples são constituídos de uma única folha de grafeno enrolada e apresentam diâmetro na ordem de  $1,4\text{ nm}$  (similar ao diâmetro do fulereno  $C_{60}$ ). De um modo geral a estrutura atômica e a morfologia dos nanotubos de carbono são definidas por dois parâmetros estruturais, isto é, o diâmetro e a quiralidade (helicidade). Ambos são definidos pelo par ordenado  $(m, n)$  denominados Índices de Hamada.

Ao dobrar-se uma folha de grafeno em torno de um cilindro de tal forma que o início e o fim de um vetor  $(m, n)$  na estrutura plana do grafeno se unam, um nanotubo  $(m, n)$  é obtido. Os índices  $(m, n)$  determinam o diâmetro do nanotubo, e também a quiralidade. Os tubos  $(m, m)$  são do tipo *arm-chair* (braços de poltrona), pois os átomos ao redor da circunferência estão em um padrão de poltrona. Os tubos  $(m, 0)$  são denominados nanotubos *zig-zag* por causa da configuração atômica ao longo da circunferência. Os outros tipos de nanotubos são os chamados nanotubos *quirais*, com as linhas de hexágonos em espiral ao longo do eixo do nanotubo (Fig. 2.5).

As propriedades elétricas dos nanotubos são sensíveis aos índices  $(m, n)$ , ou seja, as propriedades elétricas dependem do diâmetro e da quiralidade. Um SWCNT pode ser metálico ou

semicondutor, dependendo dos parâmetros estruturais  $(m, n)$ . Os nanotubos MWCNTs consistem de cilindros concêntricos, com um espaçamento médio entre as camadas em torno de  $0,34\text{ nm}$  e um diâmetro tipicamente da ordem de  $10 - 20\text{ nm}$ , onde cada tubo individual pode ter quiralidade diferente.

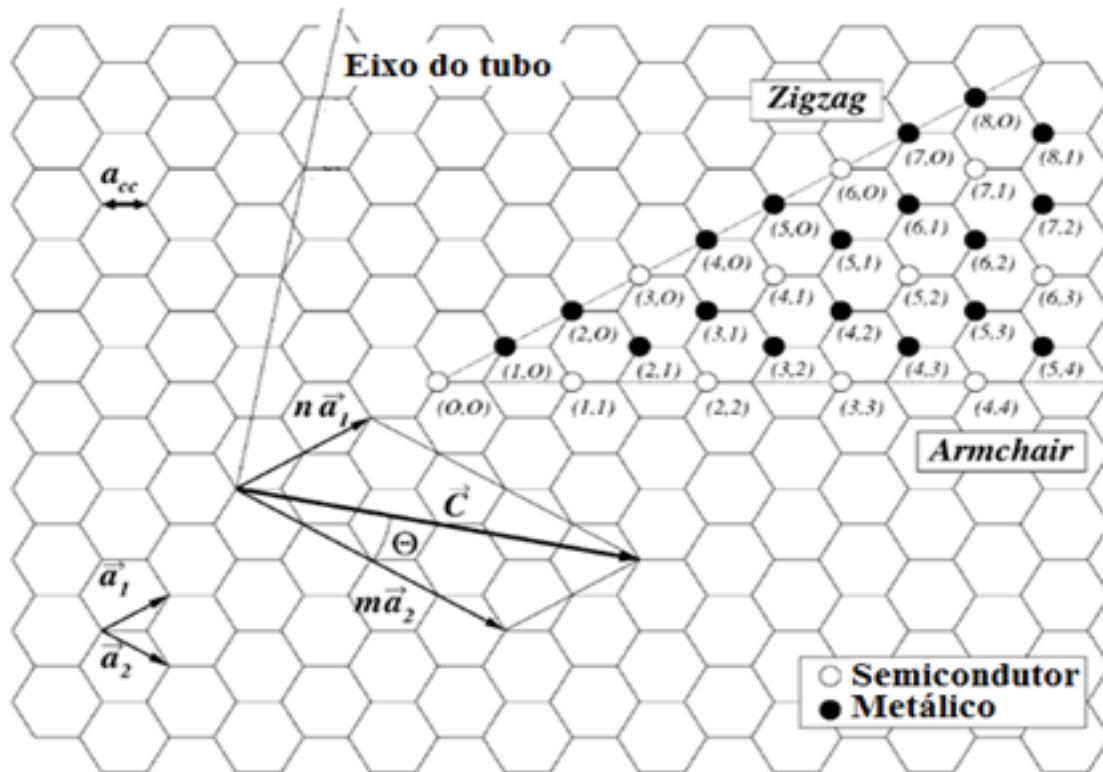


Figura 2.5 – Folha de grafeno bi dimensional;  $\vec{C}$  - Vetor quiral,  $\vec{a}_1$  e  $\vec{a}_2$  - Vetores unitários da célula hexagonal ,  $\theta$  - Ângulo quiral. - Adaptada de (BELIN E EPRON, 2005).

Nanotubos de paredes simples são completamente descritos, com exceção de seu comprimento, por um único vetor  $\vec{C}$  (denominado vetor quiral). Dois átomos em uma folha de grafeno planar são escolhidos e um é usado como origem. O vetor quiral  $\vec{C}$  é apontado a partir do primeiro átomo para o segundo (Fig. 2.5) e é definido pela relação:

$$\vec{C} = m\vec{a}_1 + n\vec{a}_2 , \quad (2.1)$$

onde  $m$  e  $n$  são inteiros. Os vetores  $\vec{a}_1$  e  $\vec{a}_2$  são os vetores unitários da célula hexagonal da malha bidimensional formada pela folha de grafeno. A direção do eixo do nanotubo é perpendicular ao

vetor quiral e o comprimento de  $\vec{C}$  é a circunferência do nanotubo,  $c$ , dada pela seguinte relação:

$$c = |\vec{C}| = a\sqrt{n^2 + nm + m^2}, \quad (2.2)$$

onde o valor  $a$  é o comprimento do vetor unitário da célula hexagonal de C. Este comprimento está relacionado com o comprimento de ligação  $C - C$ ,  $a_{cc}$ , dado por

$$a = |\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a_{cc}\sqrt{3}. \quad (2.3)$$

Para o grafite, o comprimento de ligação carbono-carbono é  $a_{cc} = 0,1421\text{ nm}$ . O mesmo valor é, frequentemente, utilizado para os nanotubos (BETHUNE *ET AL*, 1993). Entretanto, provavelmente, um valor um pouco maior, como  $a_{cc} = 0,144\text{ nm}$  deve ser uma melhor aproximação, devido à curvatura do tubo (WANG *ET AL*, 2004). Utilizando o comprimento circunferencial,  $c$ , o diâmetro do nanotubo de carbono,  $d$ , é dado pela relação:

$$d = \frac{c}{\pi}. \quad (2.4)$$

O ângulo entre o vetor quiral e o eixo do nanotubo zig-zag é o ângulo quiral,  $\theta$ , que pode ser observado na Fig. 2.5. Com os inteiros  $m$  e  $n$ , introduzidos anteriormente, o ângulo de helicidade (ângulo quiral) pode ser definido por:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{m\sqrt{3}}{m + 2n} \right). \quad (2.5)$$

A concepção do nanotubo de carbono como uma folha de grafeno enrolada permitiu a idealização da estrutura dos nanotubos, mas embora o mecanismo de crescimento dos nanotubos de carbono tenha sido muito discutido, ainda existem algumas especulações sobre o real modo de crescimento dos nanotubos. Iijima et al. (1991) especularam que o crescimento dos NTCs é impulsionado pela formação de um núcleo. Existem dois modelos possíveis propostos para o crescimento de NTCs: crescimento ponta e crescimento radicular. No primeiro, uma ponta tubular é aberta para que os átomos de carbono possam ser adicionados à sua circunferência, onde o metal catalisador promove a reação de crescimento e também impede o fechamento da

ponta dos tûbulos. Hafner et al. (1998) propuseram que moléculas de fulereno agiriam como os núcleos de crescimento tal que o diâmetro dos tûbulos irá determinar o tamanho do NTC. O último modelo é baseado no diagrama de fases do carbono e de um metal. Os NTCs crescem quando a dissolução de carbono e metal fundido é resfriada e solidificada e, então, o carbono precipita. Dessa forma, mais provas experimentais convincentes são necessárias para uma melhor compreensão do crescimento dos NTCs.

#### 2.4.1 *Síntese de nanotubos de carbono*

Desde a sua descoberta, uma variedade de métodos foi desenvolvida para a síntese de nanotubos de carbono, incluindo a deposição de vapor químico (CVD) de hidrocarbonetos, descarga de arco, ablação por laser e assim por diante. Devido às importantes propriedades e características singulares dos NTCs, intensa pesquisa é realizada, principalmente na busca de produção em grande escala de NTCs de geometria, tamanho, pureza e qualidade controlada, sem deixar de atender aos requisitos de baixo custo, a única forma de garantir a continuidade das pesquisas e a possível aplicação industrial dos mesmos. A seguir, são apresentados breves comentários sobre as principais técnicas que são utilizadas para a produção de nanotubos carbono.

##### **a) Método de deposição de vapor químico (CVD)**

Gases de hidrocarbonetos são usados como precursores de carbono para produzir tanto nanotubos de carbono de parede única e de parede múltipla, via deposição de vapor químico (CVD). O método CVD tem sido utilizado com sucesso na fabricação de fibras de carbono, filamentos e materiais de nanotubos a mais de duas décadas. O mecanismo geral de crescimento dos NTCs em um processo CVD envolve a dissociação de moléculas de hidrocarbonetos catalisadas por metais de transição e os átomos de carbono resultantes difundem-se através da partícula e precipitam-se como parte do nanotubo sobre um lado da partícula (HAFNER ET AL, 1998). O processo de síntese de NTCs por CVD de hidrocarbonetos consiste em aquecer um material catalisador a altas temperaturas em um forno tubular e um fluxo de gás de hidrocarbonetos através do reator por um longo período de tempo. As espécies do catalizador são tipicamente nanopartículas de metais de transição, que são formadas por material de apoio, como o óxido de alumínio poroso (alumina), com grandes áreas de superfície.

A síntese de nanotubos de carbono de parede simples, usando a deposição de vapor químico de plasma avançado (PECVD), é uma nova e atraente técnica para síntese de NTCs porque pode controlar independentemente as variáveis de síntese tais como a temperatura do substrato, a composição do gás, a densidade de energia do plasma e a pressão de operação. A síntese de SWCNTs foi realizada utilizando radiofrequência PECVD (KATO *ET AL*, 2003 e 2004) e microondas blindado PECVD (WANG *ET AL*, 2004). A dissociação dos hidrocarbonetos no plasma tem sido sugerida como um mecanismo que permite a síntese de nanotubos de carbono e nanofibras de carbono (NFCs) em baixas temperaturas o que ajuda a controlar a composição química do gás perto do substrato de crescimento. No entanto, o crescimento de NTCs pelo PECVD tem sido tradicionalmente limitado à produção de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MASCHMANN *ET AL*, 2006).

A maioria dos métodos CVD para a síntese de MWCNTs utiliza o metano, monóxido de carbono, etileno ou acetileno como matéria-prima de carbono, e a temperatura de crescimento é geralmente na faixa de 823 – 1023 *K*. Os catalisadores frequentemente utilizados são nanopartículas de ferro, níquel ou cobalto. Ainda segundo Zeng et al. (2006), a temperatura do processo tem um forte efeito sobre a deposição de carbono e sobre o crescimento dos nanotubos de carbono. Se a temperatura estiver muito baixa, a velocidade da decomposição dos hidrocarbonetos também é muito lenta, o que irá resultar em uma diminuição na concentração dos átomos de carbono, assim, o crescimento dos nanotubos de carbono irá parar facilmente. No entanto, se a temperatura de reação é muito elevada, a velocidade da decomposição de hidrocarbonetos é também muito elevada, evitando o alinhamento dos átomos de carbono para formar os nanotubos de carbono e os átomos de carbono são depositados como carbono amorfo. Outra constatação é que o hidrogênio tem um papel crucial no crescimento dos nanotubos de carbono. Isso ocorre porque o hidrogênio tem dois efeitos importantes durante o processo de reação: um é a redução do catalisador, o outro é controlar a velocidade de decomposição dos hidrocarbonetos. Se não houver hidrogênio no processo de síntese, a velocidade de decomposição dos hidrocarbonetos é muito alta para a deposição ocorrer com regularidade e os átomos de carbono serão depositados em forma de carbono amorfo. No entanto, a concentração muito elevada de hidrogênio será desvantajosa para a síntese de nanotubos de carbono.

Embora a dissociação dos hidrocarbonetos em baixas temperaturas afete a pureza dos

nanotubos produzidos, a vantagem é que é um método relativamente simples e pode ser adotado para produzir nanotubos em escala correspondente à escala industrial. Nanotubos de multiphas camadas já foram produzidos comercialmente, com quantidades que vão desde quilogramas até toneladas. Um aspecto original das técnicas CVD é a sua capacidade de sintetizar as matrizes de nanotubos de carbono alinhados de diâmetro e comprimento controlável (Fig. 2.6). Contudo, está claro que o desenvolvimento de um método para produzir nanotubos de carbono de alta qualidade por decomposição catalítica pode levar a sua produção comercial em massa.

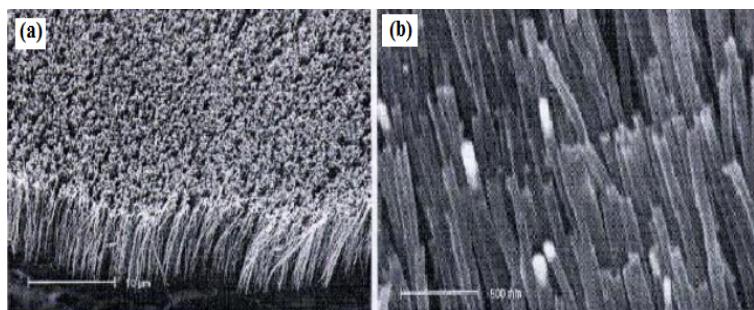


Figura 2.6 – Imagem por microscópio eletrônico de varredura de SWCNTs preparados sobre substratos de quartzo. (a) Nanotubos alinhados, normais a superfície do substrato e (b) nanotubos depois da remoção de impurezas dos extremos dos tubos.

### b) Método de descarga de arco elétrico

Historicamente, a descarga de arco elétrico foi a primeira técnica usada para a síntese de ambos os tipos de nanotubos de carbono, MWCNTs e SWCNTs (IIJIMA, 1991). Esta técnica foi melhorada de modo que pode ser usada para a produção de feixes com grande número de nanotubos de carbono. A técnica de descarga de arco, geralmente, envolve o uso de dois bastões de grafite de alta pureza como o ânodo e o cátodo. Um ânodo de grafite é mergulhado em um recipiente aberto de nitrogênio líquido contendo um pequeno cátodo não consumível de cobre ou grafite. Os eletrodos são momentaneamente postos em contato produzindo um arco elétrico. Como o ânodo é consumido, uma distância constante entre o ânodo e o cátodo é mantida por ajuste da posição do ânodo. Para sintetizar os nanotubos de parede simples os eletrodos são dopados com uma pequena quantidade de partículas de catalisador metálico.

Há alguns relatos sobre uma técnica de síntese contínua de NTCs por decomposição de metano ( $CH_4$ ), usando um jato de plasma de arco. Nesta técnica, os nanotubos de carbono são produzidos em uma condição de flutuação mediante a introdução de  $CH_4$  e do metal precursor

no jato da chama do arco, que tem as propriedades do plasma térmico de alta temperatura ( $5000 - 20000\text{ K}$ ) e de alta velocidade ( $100 - 1000\text{ ml/s}$ ). O  $\text{CH}_4$  é diretamente convertido em carbono sólido contendo NTCs na zona de plasma quente. O processo de jato de plasma de arco é um processo contínuo e pode ser facilmente expandido, além de ser uma técnica promissora para a produção comercial em grande escala de nanotubos carbono. Pelo fato de que o método de descarga de arco pode produzir nanotubos de carbono altamente cristalizados sob condições de alta temperatura (cerca de  $5000\text{ K}$ ), tem sido amplamente utilizado para a síntese de nanotubos de carbono. No entanto, ainda é difícil usar o método convencional de descarga de arco para a produção comercial por causa de suas desvantagens: o processo de síntese não é contínuo e a pureza de síntese é pobre. Especialmente, os processos não contínuos decorrem do tempo de vida limitado do eletrodo de grafite usado como fonte de carbono e da deposição do produto nas paredes internas do reator. Em outras palavras, o processo de síntese não é contínuo e deve ter um período de encerramento das operações para repor novo eletrodo e recolher o produto em uma fase de extinção do vácuo.

### c) Método de ablação por laser

Nanotubos de carbono de parede única, semelhantes aos produzidos pelo método de descarga de arco, podem ser formados através de ablação por laser. Em 1996, Hafner et al. (1998) desenvolveram com sucesso um método de ablação por laser para produção em massa de SWCNTs. O sistema utilizado para a síntese de NTCs tem uma configuração horizontal, que consiste de um tubo de quartzo que é montado em um forno com temperatura controlada. Uma haste alvo é colocada axialmente no meio da zona de alta temperatura. Após a selagem e evacuação do tubo um gás inerte flui através dele. Posteriormente, um feixe de laser pulsante Nd: YAG é focalizado sobre a haste alvo. O fluxo de gás portador varre a maioria das espécies de carbono produzidas pela evaporação laser para fora da zona do forno, depositando as espécies como a fuligem em uma haste de cobre refrigerada a água (MASER *ET AL*, 2002). Dresselhaus et al. (1996) utilizaram um laser pulsado de alta frequência (sub picosegundo) para a produção, em larga escala, de nanotubos de carbono de parede única (SWCNTs) pela técnica de vaporização por laser pulsado (PLV) e obtiveram SWCNTs com notável uniformidade de diâmetro, que é distribuída principalmente em torno de  $1,3\text{ nm}$ . Além disso, os nanotubos de carbono parecem

fios enrolados com o comprimento de várias centenas de micrômetros. Estudos mostraram que o diâmetro dos túbulos pode ser controlado, até certo ponto, mudando o tipo de metal catalisador e também a temperatura de reação do forno (HAFNER *ET AL*, 1998). De um ponto de vista experimental, a questão-chave na produção é a manutenção das condições favoráveis nos arredores da zona de evaporação. Isso inclui a temperatura (responsável pela maior ablação), a taxa de resfriamento lento de partículas, uma maior pressão de vapor, os pequenos clusters de carbonos e de catalisadores bem como a concentração de espécies evaporadas. Infelizmente, essa abordagem para a produção de material de alta qualidade é incompatível com a produção em larga escala.

#### **d) Formação eletrolítica de nanotubos de carbono**

Nanotubos de carbono estão sendo produzidos por eletrólise de sais alcalinos fundidos utilizando eletrodos de carbono sob uma atmosfera de argônio. O dispositivo é constituído de um tubo de quartzo com entrada e saída de gás e conectores elétricos nas extremidades. O ânodo tem a forma de um cadinho feito pela perfuração de um buraco em um bloco cilíndrico de grafite de alta pureza. O cátodo está imerso no eletrólito em diferentes profundidades que podem ser reguladas ao apertar ou desapertar o ânodo e o cátodo, conforme necessário. O eletrólito contido no cadinho é aquecido por um forno externo. O cadinho é preenchido com sais iônicos e os nanotubos produzidos são geralmente de parede múltipla. No entanto, este método também foi descrito para a obtenção de SWCNTs (BAI *ET AL*, 2002).

Os principais parâmetros no processo de síntese de NTCs por eletrólise são a densidade de corrente, a tensão da fonte, a temperatura e a composição do eletrólito. Segundo Masser et al. (2002), infelizmente, esses parâmetros são interdependentes, o que torna difícil determinar seus efeitos sobre a produção de nanotubos. A densidade de corrente catódica ( $I$ ) é responsável por afetar o grau de erosão do cátodo, com a erosão crescente com o aumento da corrente ( $I$ ). Esta erosão impede a execução do processo por longos períodos, porque todo o cátodo é consumido. A temperatura ótima para a produção de diferentes nanotubos depende de cada composição do eletrólito, com a pureza diminuindo significativamente em ambos os lados da temperatura ótima. Segundo Zeng et al. (2006), para eletrólitos de  $NaCl$  e  $LiCl$ , a temperatura ótima estava um pouco acima do ponto de fusão do sal. O eletrólito utilizado teve uma grande influência sobre a pureza, mas, como discutido anteriormente, o mesmo acontece

com a temperatura. Consequentemente, o cuidado deve ser exercido na interpretação dos resultados sobre os diferentes tipos de eletrólitos, porque uma pureza pobre pode ser devido tanto a temperatura quanto ao eletrólito. Ainda, segundo os autores, curiosamente, os eletrólitos que produziram as maiores purezas tiveram a menor taxa de erosão do cátodo. Este método é único quando comparado com outros métodos de produção porque ocorre na fase condensada e usa o grafite como matéria-prima em temperaturas relativamente baixas (os métodos de vaporização a arco e a laser também usam grafite como matéria-prima, entretanto tiram o grafite a altas temperaturas).

#### **e) Técnica solar para síntese de nanotubos de carbono**

O uso da luz solar concentrada para a produção de nanotubos, foi descrito por Laplaze et al. (1998). O carbono e uma mistura catalítica foram vaporizados pela incidência de energia solar concentrada. Uma bomba de vácuo de alto fluxo manteve a pressão constante. O gás inerte (*Ar* ou *He*) entra no tubo de quartzo e varre sua superfície interior para evitar a condensação dos vapores de carbono e do catalisador. Um espelho parabólico, posicionado acima da câmara, foca a luz solar recolhida sobre o material alvo. A temperatura de vaporização permanece na faixa entre 2900 e 3000 *K*. A mistura (gás inerte, carbono e vapores catalíticos) é então aspirada entre o alvo e o tubo de grafite na parte de trás do reator. Um trocador de calor resfriado a água arrefece a mistura de gases antes da sua entrada em um filtro. O alvo é formado por um cilindro de grafite dentro do qual uma mistura de grafite compactado e pó de catalisador é inserida através dos furos da superfície da haste. A qualidade do produto foi investigada em relação aos parâmetros de processo, incluindo o comprimento da vara e o gás inerte. E segundo os autores ambos os parâmetros afetam fortemente a quantidade de nanotubos de carbono, mas a influência do gás inerte é dominante. A vantagem do método é o uso da luz solar para induzir a vaporização do alvo e, como no processo de ablação por laser, há possibilidade de controlar cada um dos parâmetros de síntese de forma independente.

#### *2.4.2 Purificação de nanotubos de carbono*

Embora os nanotubos de carbono possuam muitas propriedades únicas e tecnicamente importantes, os produtos resultantes dos diferentes processos de síntese contém, geralmente,

uma grande quantidade de impurezas, como carbono amorf, as nanopartículas de carbono e partículas de catalisador. A falta de nanotubos de carbono puros pode limitar o estudo dos fundamentos, propriedades e o desenvolvimento de mais aplicações práticas. Segundo Wang et al. (2003) muitos esforços têm sido dedicados ao desenvolvimento de novos procedimentos e para a otimização das condições para o aumento da produção de nanotubos de carbono de grande pureza sem destruir a sua estrutura geométrica. Os diferentes métodos de preparação de nanotubos de carbono tornam a pesquisa de purificação complicada. Vários métodos, incluindo a oxidação do gás em ar ou oxigênio, a filtração da dispersão e oxidação química em solução, têm sido desenvolvidos para a purificação de nanotubos de carbono. Kato et al. (2004) estudaram um método de extração dinâmica para purificar NTCs hidrotermicamente e obtiveram NTCs com mais de 95% de pureza. Chiang et al. (2001) purificaram amostras de NTCs com refluxo ácido, com refluxo de água, e um processo de oxidação na fase de gás em duas etapas. Um método não destrutivo e de alta capacidade de purificação de nanotubos de carbono de parede única utilizando funcionalização química foi empregado por Lian et al. (2004). Neste método, os nanotubos de carbono de parede única produzidos por descarga de arco foram inicialmente tratados com  $K_2S_2O_8$  e diluídos em solução de  $H_2SO_4$  para gerar grupos funcionais oxigenados como para variar os componentes de carbono. A vantagem deste procedimento reside no alto rendimento e recuperação não destrutiva do material. Análises de absorção ótica, espectroscópica e termogravimétrica mostraram uma pureza que está em mais de 90% em massa. O método de purificação de nanotubos de carbono, apresentado por Vivekchand et al. (2004), envolve a lavagem ácida seguida por tratamento de hidrogênio na faixa entre 973 e 1273 K. Considerando que a lavagem ácida dissolve as partículas de metal, o tratamento de hidrogênio remove o carbono amorf, bem como o revestimento de carbono das nanopartículas de metal. A alta qualidade dos nanotubos obtidos após a purificação foi comprovada por microscopia eletrônica, difração de raios-X e métodos espectroscópicos.

#### 2.4.3 Aplicação imediata para nanopartículas

A eficiência energética e a miniaturização de componentes tornaram-se as principais tendências de desenvolvimento da ciência e da tecnologia. Tais tendências são ditadas pela

iminente crise energética, pela escassez de matéria prima e por restrições em termos de espaço. Esta tendência já pode ser verificada nas indústrias de eletrônica, telecomunicações, transporte, aeroespacial e outras, onde ocorre imenso aumento da potência dos equipamentos e a simultânea redução das dimensões dos mesmos. A concepção de dispositivos de dimensões cada vez menores, associada ao aumento da potência dos equipamentos, tem exigido maior atenção no que diz respeito ao gerenciamento térmico e, por isso, a transferência de calor é alvo de intensivas pesquisas.

Um sistema de arrefecimento eficaz pode ser alcançado através da intensificação do processo de transferência de calor por meio das chamadas técnicas ativas e passivas (BERGLES, 1985). As técnicas ativas para a melhoria da transferência de calor compreendem a utilização de rotação, vibração e aplicação de campos eletrostáticos ou magnéticos. Contudo, a exigência de uma entrada de energia externa é cara e inconveniente para situações críticas em termos de espaço e aporte de mais energia. As técnicas passivas de intensificação do processo de transferência de calor incluem métodos para modificar as propriedades dos fluidos, a forma e o material da superfície de troca de calor, a rugosidade ou fixação de elementos para aumentar a área de superfície e/ou tornar o fluxo turbulento.

Alguns resultados nesta área já podem ser observados em relação ao desenvolvimento de sistemas de transferência de calor de alta eficiência térmica, peso e dimensões reduzidas e, consequente, redução dos custos de fabricação e operação como é o caso, por exemplo, da tecnologia de transferência de calor em escala micro, onde os denominados microcanais ocupam posição de destaque. No entanto, essas melhorias não são suficientes para as necessidades atuais e, assim, o grande avanço no projeto, nos processos de fabricação, nos materiais e nos dispositivos de controle operacional dos sistemas de transferência de calor ganha, agora, um novo impulso, ao se concentrar esforços na melhoria das características termofísicas dos fluidos de trabalho pela adição de nanopartículas sólidas nos mesmos.

A utilização de partículas sólidas suspensas nos fluidos convencionais de transferência de calor como um aditivo é uma técnica empregada para contornar a limitada condutividade térmica de tais fluidos e, com isso, incrementar a transferência de calor. Esta alternativa foi introduzida por Maxwell na tentativa de modificar as propriedades termofísicas de fluidos (MAXWELL, 1873). Assim, já é sabido que a suspensão de partículas sólidas em uma matriz líquida proporciona

ona vantagens úteis em aplicações nos sistemas industriais, incluindo fluidos de transferência de calor, fluidos magnéticos e fluidos lubrificantes.

A condutividade térmica de um fluido de transferência de calor desempenha papel importante no projeto e desenvolvimento de equipamentos de transferência de calor energeticamente eficientes. Assim, a melhoria da condutividade térmica é a idéia-chave para melhorar as características de transferência de calor dos fluidos convencionais, mas a utilização de partículas sólidas de tamanho milimétrico ou micrométrico veio acompanhada de problemas tais como: a rápida precipitação das partículas sólidas, abrasão da superfície de troca de calor e entupimento dos canais de fluxo.

Mais detalhadamente, os estudos e experimentos realizados com suspensões de partículas de tamanho micro e milimétrico apresentaram as desvantagens, que podem ser assim enumeradas:

1. Sedimentação - as partículas tendem a sedimentar após algum tempo criando assim uma camada junto à superfície comprometendo a capacidade de troca de calor.
2. Desgaste - a sedimentação pode ser reduzida com o aumento da vazão mássica (velocidade do fluido), mas com consequente aumento do desgaste dos componentes do sistema e da tubulação devido à ação abrasiva das partículas.
3. Obstrução - devido à sedimentação das partículas os canais tendem a ficar obstruídos, principalmente quando os canais de fluxo são estreitos.
4. Perda de carga - experimentos mostram que a perda de carga aumenta exponencialmente com o aumento da concentração de partículas sólidas na suspensão.
5. Condutividade térmica - a condutividade térmica é, comprovadamente, proporcional a concentração de partículas, e assim, qualquer aumento na concentração em busca de aumento na condutividade resulta nos problemas anteriores.

Assim, a dispersão de partículas micrométricas não foi uma alternativa viável para aplicações práticas de aprimoramento da transferência de calor e a busca por novos fluidos de transferência de calor continuou.

Modernas tecnologias de fabricação permitem a produção de materiais na escala nanométrica. Esta nova classe de material exibe propriedades físicas e químicas únicas quando comparadas com as propriedades de partículas grandes (escala micrométrica ou maiores) dos mesmos materiais. Tais materiais têm instigado investigações em, praticamente, todas as áreas da ciência e tecnologias.

Masuda et al. (1993) foram os primeiros a realizar experimentos para mostrar que houve alteração nos valores da condutividade térmica e na viscosidade dos líquidos que continham partículas ultrafinas ( $13\text{ nm}$ ) dispersas. No entanto, o conceito de nanofluidos foi materializado por Choi (1995), após a realização de uma série de trabalhos de pesquisa no Laboratório Nacional da Argonne, nos Estados Unidos, enquanto buscava intensificar o processo de transferência de calor e, segundo os autores, o conceito surgiu da busca pela melhoria do processo de transferência de calor para elementos óticos de aparelhos de raios X com elevadas taxas de calor. Desde então, muitos pesquisadores estão realizando experiências nas quais utilizam diferentes tipos de nanopartículas, principalmente, nanopartículas metálicas e de óxidos metálicos que são adicionadas como aditivos para diferentes fluidos base.

Pesquisas posteriores de Choi e Eastman (1995), Xuan e Li (2000) e Wang e Mujumdar (2007) demonstraram que os nanofluidos apresentaram maior condutividade térmica, mesmo para baixas concentrações de nanopartículas suspensas, mas segundo Li e Xuan (2002), embora esta tecnologia já exista a alguns anos, a aplicação dos nanofluidos ainda requer mais estudos, devido a disparidade nos resultados obtidos por diferentes grupos de pesquisa. No entanto, apesar das diferenças nos resultados experimentais, já é consenso que os principais fatores que afetam as propriedades de transferência de calor dos nanofluidos são: o tipo, o tamanho, a forma (razão de aspecto) e a fração em volume de nanopartículas dispersas, a condutividade térmica do fluido base e das nanopartículas e a temperatura do fluido.

## 2.5 Nanofluido

Os fluidos convencionais de transferência de calor possuem condutividade térmica reduzida, comparada com metais e óxidos, conforme ilustra a Tabela 2.1

Choi e Eastman (1995) foram os primeiros a demonstrar que nanopartículas altamente

condutoras dispersas em um líquido em repouso (chamado nanofluido), mesmo em baixas frações em volume de nanopartículas, podem aumentar de modo sensível a condutividade térmica efetiva da suspensão, quando comparado com o líquido puro. Segundo Amrollahi et al. (2008) a maior e fundamental diferença entre um nanofluido e as suspensões convencionais é que, devido ao pequeno tamanho das partículas dispersas no fluido, a mecânica quântica das propriedades dos elétrons no interior da matéria e o efeito recíproco dessas partículas em cada outra resulta no deslocamento da matéria em escala nanométrica, de modo que, é possível mudar e controlar as propriedades inerentes da matéria, sem qualquer alteração em suas propriedades químicas.

Tabela 2.1 – Condutividade térmica de alguns materiais e fluidos utilizados em nanofluidos.

Materiais	Condutividade térmica [ W/mK ]
Cobre (Cu)	401
Prata (Ag)	426 – 428
Ouro (Au)	317 – 318
Diamante (C)	2300
Nanotubos de nitreto de boro (BNNTs)	260 – 600
Nanotubos de carbono (NTCs)	240 – 3000
Óxido de alumínio (Alumina) ( $Al_2O_3$ )	36 – 40
Óxido de zinco ( $ZnO$ )	116
Óxido de cobre ( $CuO$ )	69 – 76,5
Carbeto de silício ( $SiC$ )	270 – 490
Água ( $H_2O$ )	0,613
Etileno Glicol (EG)	0,253
Óleo de motor	0,145
Polialfaolefina (PAO)	0,142

Fonte: Adaptada de (SHANTHI ET AL, 2012).

Como os metais e seus óxidos têm sempre maior condutividade térmica do que os fluidos, a idéia da dispersão dessas partículas sólidas em um líquido para o aumento da condutividade do líquido foi proposta. A versão nanofluidica, isto é, o uso de nanopartículas, incrementa as propriedades de transferência de calor do líquido, aumenta a estabilidade da suspensão, reduz a sedimentação e a obstrução dos canais de fluxo. Também devido à baixa energia cinética transmitida a partir de nanopartículas, o impacto de partículas em uma superfície provoca menos atrito e erosão e, portanto, resulta em praticamente nenhum dano às bombas e canais de escoamento. Portanto, o uso mais provável de nanofluidos pode ser no setor de transportes, onde, utilizando-os como fluidos refrigerantes resulta em mais eficiência e trocadores de calor menores, podendo também ser muito eficazes quando utilizados na indústria aeroespacial e de microeletrônica.

Choi (1995) concebeu o novo conceito de nanofluidos, fazendo uso de partículas de tamanhos na ordem de 1 a 100 nm. Choi e Eastman (1995) cunharam o termo *nanofluido* para descrever uma nova classe de fluido de transferência de calor baseada em nanotecnologia e que são produzidos pela dispersão de partículas de tamanho nanométrico (em, pelo menos, uma dimensão) nos fluidos convencionais de transferência de calor, com ou sem a adição de um agente tensoativo (dispersante/surfactante - para aumentar a estabilidade). Em comparação com suspensões convencionais de partículas de dimensões milimétricas ou micrométricas, nanofluidos apresentam melhor estabilidade, alta condutividade térmica e queda de pressão desprezível (WANG E MUJUNDAR, 2007).

Ao suspender partículas de tamanho nanométrico em líquidos de aquecimento ou arrefecimento, o desempenho da transferência de calor de tais fluidos pode ser significativamente melhorado e, segundo Xuan e Li (2000), esta melhoria deve-se principalmente:

1. As nanopartículas suspensas aumentam a área de superfície e a capacidade térmica do fluido (elevada superfície de contato partícula/fluido).
2. As nanopartículas em suspensão aumentam a condutividade térmica efetiva do fluido (nanopartículas de elevada condutividade térmica).
3. A interação e colisão entre as partículas, entre as partículas e o fluido e entre as partículas e a superfície de passagem de fluxo é intensificada.
4. A dispersão de nanopartículas achata o gradiente de temperatura transversal do fluido na sua passagem de fluxo.
5. A potência de bombeamento é baixa quando comparada com aquela necessária para que fluidos puros possam atingir equivalentes níveis de melhoria na transferência de calor.
6. Os problemas relativos à sedimentação, abrasão e entupimento são reduzidos quando comparados com suspensões convencionais de partículas micrométricas.

As nanopartículas utilizadas em nanofluidos são produzidas a partir de diferentes materiais por intermédio de distintos processos de síntese química e física. Os processos atuais,

especificamente, para a obtenção de nanopartículas metálicas incluem a moagem mecânica, técnica de condensação em gás inerte, precipitação química, deposição de vapor químico, micro emulsões, pulverização por pirólise e pulverização térmica. Segundo Yu e Xie (2011), a maioria das nanopartículas é produzida na forma de pó e, portanto, podem ser dispersas em líquidos aquosos ou orgânicos para formar nanofluidos de aplicações específicas.

As nanopartículas mais comumente utilizadas para produzir os nanofluidos são: óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), cobre ( $Cu$ ), óxido de cobre ( $CuO$ ), ouro ( $Au$ ), prata ( $Ag$ ), silício ( $Si$ ), carboneto de silício ( $SiC$ ), nanotubos de nitreto de boro ( $BNNTs$ ) e nanotubos de carbono ( $NTCs$ ). Como fluido base, os mais utilizados tem sido a água, etileno glicol, óleo, acetona e deceno (TRISAKSRI *ET AL*, 2007).

### 2.5.1 Preparação de nanofluidos

A preparação de nanofluidos é uma operação delicada e exige tratamento específico, não tratando-se, portanto, de uma simples mistura sólido-líquido. Ainda são pouco conhecidos os fenômenos físicos e químicos que podem ocorrer com materiais nessa escala. Segundo Eastman et al (1997) o desenvolvimento de nanofluidos é um fator importante para a otimização do incremento das propriedades térmicas do fluido base, pois a produção de uma suspensão coloidal com características especiais exige tratamento específico. Ainda, segundo o autor, a produção em grande escala e com custo reduzido é necessária para a aplicação prática de nanofluidos. O nanofluido necessita de requisitos especiais, tais como uma suspensão uniforme, duradoura, resistente, estável, com aglomeração de partículas desprezível e nenhuma alteração química do fluido.

Existem, basicamente, dois métodos para a produção de nanofluidos, o método de um passo (*single-step method*) e o método de dois passos (*two-step method*). Até o presente momento, nanofluidos de várias características foram produzidos, em pequenas quantidades, principalmente pela técnica de dois passos.

Na preparação de nanofluidos pelo método de um passo, segundo o qual, a nanopartícula é produzida e, simultaneamente, dispersa em um fluido base, pode-se destacar o trabalho de Eastman et al. (1997) no qual foi realizada a condensação direta de nanopartículas de  $Cu$  dentro

de um fluxo de vapor de etileno glicol a baixa pressão. O processo denominado Vacuum-SANSS (*submerged arc nanoparticle synthesis system*) ou sistema de síntese de nanopartículas por arco submerso, apresentado por Lo et al. (2005) também permite a preparação de nanofluidos com partículas de *Cu* em diferentes fluidos base.

No método de dois passos, as nanopartículas são inicialmente produzidas em forma de pó e, posteriormente, dispersas no fluido base. Este método está sendo extensivamente utilizado na preparação de nanofluidos, principalmente, pelo fato de já existirem diversos tipos de nanopartículas, de diferentes materiais, disponibilizadas no mercado por diferentes fornecedores. Geralmente este método requer o emprego de energia externa, tais como ultrasonicação, vibração magnética ou homogeneização por alta pressão, para romper os aglomerados de nanopartículas e contribuir para a homogeneidade e estabilidade da dispersão. Xuan e Li (2000) sugeriram alguns artifícios para estabilizar as suspensões: manipular o valor de pH da suspensão, usar ativadores de superfície e/ou dispersantes e aplicar energia externa por intermédio de vibração ultrassônica. Estes artifícios, na realidade, podem alterar as propriedades da superfície das partículas em suspensão e podem ser utilizados para suprimir a formação de aglomerados de partículas a fim de obter suspensões estáveis. No entanto, a escolha da técnica depende da aplicação desejada para o nanofluido a ser produzido. A seleção adequada de ativadores e dispersantes depende, principalmente, do tipo de nanopartícula e das propriedades desejadas para a solução.

Entre os fatores considerados na preparação de nanofluidos estão a técnica de síntese, o material, o tamanho e a forma das nanopartículas. Entretanto, é a concentração de nanopartículas na suspensão o parâmetro cujo efeito tem sido mais comumente avaliado. Além disso, devido ao fato de que, nos modelos clássicos de mistura, a concentração de nanopartículas é, geralmente, referenciada como uma função da fração em volume de nanopartículas,  $\theta$ , dada por:

$$\theta = \frac{V_{np}}{V_{fb} + V_{np}}, \quad (2.6)$$

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

Sendo a massa específica dada por  $\rho = m/V$ , a massa de nanopartículas,  $m_{np}$ , a ser utilizada no preparo da suspensão, pode ser determinada em função da concentração volumétrica

de nanopartículas,  $\theta$ , e da massa de fluido base,  $m_{fb}$ , através das seguintes relações:

$$\theta = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{fb}}{\rho_{fb}} + \frac{m_{np}}{\rho_{np}}} \Rightarrow \theta = \frac{m_{np} \rho_{fb}}{m_{np} \rho_{fb} + m_{fb} \rho_{np}} \quad (2.7)$$

e

$$m_{np} = \frac{\theta m_{fb} \rho_{np}}{(1 - \theta) \rho_{fb}} \quad (2.8)$$

### 2.5.2 *Estabilidade de nanofluidos*

Do ponto de vista da química, os nanofluidos são, por definição, dispersões coloidais do tipo sol, isto é, uma mistura homogênea com partículas dispersas cujo tamanho é inferior a  $100\text{ nm}$  e na qual o dispersante é o líquido e o disperso é o sólido. Em tais suspensões, com o passar do tempo, as partículas sólidas tendem a agregarem-se devido à sua grande atividade superficial. Este inconveniente trás consequências tais como aglomeração, sedimentação, obstrução de canais de fluxo e, principalmente, a alteração das propriedades termofísicas do nanofluido. O método mais confiável e difundido para avaliar a estabilidade de suspensões coloidais tipo sol consiste na observação da variação do tamanho das partículas e/ou variação da concentração ao longo do tempo. Este é um método relativamente simples, mas sua restrição está associada aos longos períodos de observação.

Entre os métodos empregados na avaliação da estabilidade de nanofluidos destacam-se os métodos de sedimentação e centrifugação, análise do potencial Zeta e análise de absorção espectral. O espectrofotômetro Ultra Violeta é um aparelho usado para determinar a concentração de uma espécie em solução a partir do gráfico da variação da absorbância (ou transmitância) em função da concentração de várias soluções-padrão e, como existe uma relação direta entre a absorbância e a concentração de nanopartículas, a medida da absorbância pode fornecer informações sobre a variação da concentração dos nanofluidos.

Todos os métodos de avaliação mencionados apenas permitem o monitoramento da estabilidade dos nanofluidos durante um intervalo de tempo, sem mensurar a influência dos diferentes parâmetros que a afetam. Eles servem apenas de orientação para o aperfeiçoamento da estabilidade dos nanofluidos, de modo que ainda não há consenso sobre uma rota de preparação de

nanofluidos e muito menos está definido um método para ser utilizado na avaliação da estabilidade que permita a comparação de resultados entre as investigações.

Sobre os mecanismos de estabilização de nanofluidos, a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura, sugere que estes estão baseados em forças de repulsão, cujo os mecanismos fundamentais que afetam a estabilidade coloidal são divididos em dois tipos, um é a repulsão estérica e o outro é o de repulsão (carga) eletrostática. Assim, segundo Yu et al. (2007) estabilidade significa que as partículas não se agregam em uma taxa significativa e tal taxa de agregação é, em geral, determinada pela frequência de colisões e a probabilidade de coesão durante uma colisão. Também existe a teoria de que a estabilidade de uma partícula em solução é determinada pela soma das forças atrativas de Van der Waals e forças elétricas repulsivas da dupla camada que existe entre as partículas que se aproximam umas das outras devido ao movimento Browniano. Assim, para a estabilização eletrostática, a carga elétrica da superfície da partícula poderá ser modificada através de um ou mais dos seguintes mecanismos: a adsorção preferencial de íons, a dissociação de espécies de superfície carregada, a substituição isomórfica de íons, acumulação ou esgotamento de elétrons na superfície e adsorção física de espécies carregadas na superfície. Portanto, para aumentar a estabilidade, são usados os surfactantes ou métodos de modificação da superfície (dopagem) que pode ser física ou química, porém, estas últimas, são técnicas livres de surfactantes.

Embora, a adição de surfactante seja uma forma eficaz de aumentar a capacidade de dispersão das nanopartículas, os surfactantes podem causar vários problemas, tais como a contaminação da superfície de transferência de calor e da superfície das nanopartículas e, com isso aumentar a resistência térmica entre as nanopartículas e o fluido base. Além disso, os surfactantes podem produzir espumas durante o aquecimento, ao passo que aquecimento e resfriamento são processos rotineiros em sistemas de troca de calor (CHEN ET AL, 2008).

Estudos realizados concluíram que a concentração de nanopartículas, a qualidade da dispersão, a viscosidade do fluido base e o valor do pH, influenciam a estabilidade dos nanofluidos, mas o tipo de nanoparticula, a massa específica, o diâmetro e a forma, também afetam a estabilidade dos nanofluidos e, portanto, características intrínsecas das nanopartículas e do fluido base, tais como a morfologia e a estrutura química estão diretamente relacionadas com a estabilidade das suspensões de nanopartículas.

### 2.5.3 Propriedades termofísicas dos nanofluidos

A caracterização dos nanofluidos, além de considerar o tipo de nanopartículas dispersas, o método de dispersão e a concentração de nanopartículas, consiste na determinação de suas propriedades termofísicas. Embora, a caracterização de nanofluidos tem mobilizado muitos grupos de pesquisa, os resultados têm produzido calorosas discussões, tanto no que diz respeito aos resultados de medições experimentais e de simulações numéricas quanto aos resultados advindos dos modelos matemáticos desenvolvidos para prever tais propriedades.

Em relação às inconsistências dos resultados experimentais, elas são, prioritariamente, atribuídas à falhas na descrição do nanofluido, isto é, naquilo que diz respeito a técnica de preparação, o tipo e geometria das nanopartículas e a concentração em volume de nanopartículas. Há também, além disso, quem questione a capacidade de os métodos e equipamentos convencionais, desenvolvidos para fluidos puros, serem eficazes na medição das propriedades dos nanofluidos. Por sua vez, a falta de concordância entre os resultados experimentais e aqueles previstos a partir de modelos convencionais é atribuída ao fato de que estes não são capazes de levar em conta efeitos que podem ocorrer com matérias em escala nanométrica.

#### Massa específica:

Na maioria dos trabalhos, a massa específica dos nanofluidos foi avaliada para ser compatível com a teoria da mistura, isto é, o cálculo da massa específica de soluções pode ser realizado a partir de regras de misturas, que são utilizadas para prever propriedades de misturas a partir das propriedades de componentes puros, o que equivale a

$$\rho = \sum \theta_i \rho_i, \quad (2.9)$$

onde  $\theta_i$  e  $\rho_i$ , são, respectivamente, a fração em volume e a massa específica de cada um dos componentes.

Ao medirem a massa específica de amostras de nanofluido de dióxido de titânio e de alumina a base de água com concentração de nanopartículas de até 31,6 %, Pak e Cho (1999), encontraram um desvio máximo de 0,6 % em relação aos resultados calculados pela teoria da regra da mistura.

Uma vez que a concentração em volume de nanopartículas na dispersão,  $\theta$ , é determinada, a massa específica da dispersão pode ser calculada a partir da equação,

$$\rho_{nf} = (1 - \theta) \rho_{fb} + \theta \rho_{np}. \quad (2.10)$$

A justificativa para o uso do modelo acima está na baixa concentração em volume de nanopartículas, geralmente, empregadas na preparação dos nanofluidos. Observa-se, no entanto, que ainda não há, na literatura, critérios definidos sobre a medição da massa específica das nanopartículas. Pelo fato de serem produzidas e comercializadas na forma de pó, os dados sobre a massa específica do produto, quando existem, são fornecidos pelo próprio fabricante.

### **Calor específico:**

No trabalho realizado por Bergman (2009), assim como no de Lee e Mudawar (2007), é enfatizado que, quando nanopartículas são adicionadas ao fluido base, além de outras propriedades, o calor específico do nanofluido resultante também é afetado e, tipicamente, o mesmo é menor do que o do fluido base. Segundo Zhou e Ni (2008), pouca atenção tem sido dada ao calor específico dos nanofluidos ainda que, a medição exata do  $c_p$  seja muito importante na avaliação do desempenho térmico de nanofluidos, haja vista que, a medida exata do calor específico é necessária nas medições da condutividade térmica, da difusividade térmica, da temperatura espacial dentro do escoamento em convecção, sendo ele, portanto, um parâmetro chave na descrição do comportamento do fluxo convectivo dos nanofluidos.

De maneira geral, o calor específico dos nanofluidos estudados na literatura, assim como a massa específica, é determinado a partir da teoria da mistura, considerando a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão, através da seguinte equação:

$$c_{p_{nf}} = (1 - \theta)c_{p_{fb}} + \theta c_{p_p}, \quad (2.11)$$

No trabalho de Khanafer e Vafai (2011), as variantes dentro das propriedades termofísicas de nanofluidos são novamente apontadas, e mais de meia década depois de Kebinski et al. (2005), terem sugerido a necessidade de mais estudos teóricos e experimentais para esclarecer as discrepâncias nos resultados e na compreensão das características de realce na transferência de

calor de nanofluidos, os resultados experimentais da condutividade térmica e viscosidade efetiva relatados por vários autores continuam em desacordo. Assim, além da Eq. (2.11), muitos autores preferem determinar o calor específico das suspensões de nanopartículas, através da seguinte equação:

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1 - \phi) (\rho c_p)_{fb} + \phi (\rho c_p)_{np}}{(1 - \phi) \rho_{fb} + \phi \rho_{np}}, \quad (2.12)$$

que, embora trabalhe com a fração em volume, também considera a capacidade térmica dos elementos envolvidos na suspensão.

### **Condutividade térmica:**

Nos estudos relativos à transferência de calor por convecção de nanofluidos, assim como nos fluidos puros, o número de Prandtl,  $Pr$ , é um grupo adimensional importante, expressando a razão de difusividade de momento (viscosidade cinemática) e difusividade térmica de um fluido, expressando a relação entre a difusão de quantidade de momento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido. Assim, no que diz respeito à capacidade de transferência de calor dos nanofluidos, a condutividade térmica é a propriedade mais importante. Segundo Godson et al. (2010), a condutividade térmica de um nanofluido parece depender de inúmeros mecanismos, sendo que os que mais frequentemente relatados podem ser, assim, enumerados:

1. Dispersão das nanopartículas suspensas - Dispersão implica que partículas com diferente posição devem manter-se estáveis por longo período de tempo. O uso de dispersantes pode aumentar a estabilidade cinética, mantendo-se praticamente inalterável com o passar do tempo. Estudos sobre a condutividade térmica de nanofluidos revelam que ela é dependente da dispersão uniforme das partículas.
2. Escoamento turbulento - Segundo Buongiorno (2006) em escoamento turbulento, a condutividade térmica efetiva do nanofluido é muito superior do que aquela encontrada em escoamento laminar, mas somente os efeitos provocados pela turbulência não são suficientes para explicar o aumento da condutividade térmica.
3. Movimento Browniano - O movimento Browniano é um movimento aleatório das partículas dispersas num fluido como consequência dos choques entre todas as moléculas ou

átomos presentes no fluido. A intensificação do movimento Browniano é diretamente proporcional à temperatura e consistente com a teoria cinética das partículas. Segundo Keblinski et al. (2002) , a transferência de energia que decorre das colisões entre as partículas mais quentes com as de menor temperatura é o principal mecanismo responsável pelo aumento da condutividade térmica nos nanofluidos. É interessante notar que o efeito do movimento Browniano é inversamente proporcional ao aumento da viscosidade.

4. Efeito Sóret - O efeito Sóret é um fenômeno observado quando uma mistura de dois ou mais tipos de partículas móveis está sujeita a um gradiente de temperatura. Este fenômeno é mais significativo em processos de convecção natural, onde fluxo é produzido por impulsão hidrostática e pelas diferenças de temperatura. Segundo Godson et al. (2010), o processo de transferência de calor aumenta com a diminuição da densidade do fluido.
5. Osmose - A osmose é um fenômeno que ocorre quando há migração das partículas de uma região de concentração mais baixa para uma região de maior concentração.
6. Influência do fluido base - As propriedades termofísicas originais do fluido base tais como a condutividade térmica, a viscosidade, entre outras, também influenciam os resultados encontrados para a condutividade efetiva dos nanofluidos. Segundo Godson et al (2010), a literatura existente ainda é escassa e mais investigação é necessária. Xie et al (2002), concluíram que em suspensões utilizando as mesmas nanopartículas, a condutividade térmica efetiva do nanofluido diminui com a aumento da condutividade térmica do fluido base. Os resultados apresentados por Hwang et al (2007), com nanofluidos de *CuO* a base de etileno glicol e água, apresentaram tendência semelhante.

#### **a) Medição da condutividade térmica dos nanofluidos**

Choi et al. (2001) mediram a condutividade térmica do nanofluido de MWCNTs dispersos em óleo (polialfaolefina) e encontraram aumento de até 160 % em relação ao fluido base original. Desde então, diferentes grupos de pesquisa têm medido a condutividade térmica, excessivamente, distante dos valores preditos pelo modelo de Maxwell (Eq. (2.13)), e, tem sido a hipótese de que o pequeno tamanho das partículas, e, portanto, a grande área de superfície é o fator responsável por esse incremento. Segundo Bocquet e Charlaix (2009), as propriedades dos

fluidos em nanoescala estão associadas aos efeitos em massa e de superfície. Por outro lado, os efeitos de superfície desempenham um papel cada vez mais importante devido à elevada relação superfície/volume.

Existem métodos de estado estacionário e transiente para a medição das propriedades térmicas (isto é a condutividade térmica e a difusividade térmica) e todos baseiam-se na equação de energia para a condução. Os métodos de estado estacionário são teoricamente simples, mas na prática eles envolvem técnica bastante elaborada, incluindo proteção térmica para eliminar fluxo de calor lateral e sistema de controle eletrônico para garantir condição estável durante o teste. Os métodos transientes fornecem medição rápida e reduzem os modos indesejáveis de transferência de calor, sendo este, talvez, o motivo pelo qual a maioria das medições de propriedades térmicas de nanofluidos tem sido feita usando-se métodos de medição transiente.

Entre os diferentes métodos empregados para a medição da condutividade térmica de nanofluidos, é possível destacar: oscilação de temperatura, placas paralelas em regime permanente (*steady-state parallel plate*) e fio quente transiente (*transient hot wire*). A técnica de fio quente transiente é, de longe, a que tem sido mais empregada, ela funciona medindo a variação da temperatura/tempo do fio quando ele é submetido a um pulso elétrico abrupto. O fio é utilizado como aquecedor (fonte de calor) e termômetro, sendo que a condutividade térmica é calculada por intermédio de uma derivação da lei de Fourier.

No trabalho de Hojjat et al. (2009), a condutividade térmica de nanofluidos foi medida usando um medidor de condutividade térmica *KD2* (*Device Decagon Inc.*). O medidor *KD2* é equipado com uma sonda, 60 mm de comprimento e 0,9 mm de diâmetro, no qual um elemento de aquecimento e um termo resistor são incorporados. A sonda é conectada a um microprocessador para controlar a adição de calor e o registro das medições necessárias para o cálculo da condutividade térmica. Diversos trabalhos chamam a atenção para a influência da convecção e dos efeitos eletromagnéticos sobre as nanopartículas dispersas. De um modo geral, os nanofluidos são bons condutores de corrente elétrica e/ou são sensíveis a efeitos de campo magnético, o que dificulta a aplicação da técnica do fio quente transiente.

Casquillas et al. (2007) apresentam o desenvolvimento de um simples dispositivo de microfluídica para a medição das propriedades térmicas de pequenos volumes de líquido (20  $\mu\text{l}$ ), idealizado e construído para determinar a condutividade térmica de suspensões de nanotubos de

carbono em etileno glicol. O dispositivo baseado no método de tira quente transiente (THS - *transient hot strip*) fundamenta-se na medição da variação de temperatura de uma tira metálica fina em contato com o material de interesse. Dadas as reduzidas dimensões da fita, a mesma pode ser considerada como um fio de um comprimento infinito, uma vez que a razão comprimento e largura é maior do que 20. A fabricação do dispositivo, capaz de medir a condutividade térmica de apenas uma gota de fluido, envolveu técnicas de fotolitografia e tecnologia de gravação utilizada na microfabricação (RIE - *Reativa-ion etching*).

### **b) Correlações para condutividade térmica de nanofluidos**

Os nanofluidos estão sendo vistos como candidatos a fluidos de trabalho em aplicações industriais e em instalações de tecnologia avançada. Portanto, é de interesse compreender os mecanismos que permitem o aumento da condutividade térmica, que tem sido observado nos experimentos. O objetivo é desenvolver a capacidade de prever as propriedades termofísicas das suspensões. Assim, seria possível preparar nanofluidos com as características específicas para determinadas aplicações. Durante os últimos anos, os esforços concentraram-se sobre os mecanismos de aumento do fluxo de calor em nanofluidos e no desenvolvimento de modelos capazes de correlacionar e prever suas propriedades, entre as quais está também a condutividade térmica.

Pelos diversos trabalhos publicados, por diferentes grupos de pesquisa, está comprovado o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos em relação ao fluido base, mesmo para sistemas de nanofluidos com baixa concentração de nanopartículas. Também é indiscutível que a condutividade térmica do nanofluido depende de diversos fatores tais como: a condutividade térmica do fluido base e da nanopartícula, a fração em volume de nanopartículas, a forma e área de superfície da nanopartícula (razão de aspecto), os movimentos estocásticos das partículas, a temperatura do fluido base e a interação líquido-sólido na superfície da nanopartícula (nanocamada interfacial) ( KEBLINSKI *ET AL*, 2002, XUE *ET AL*, 2004 e XIE *ET AL*, 2005).

Intenso trabalho está sendo realizado para desenvolver modelos que possam prever o comportamento térmico dos nanofluidos. Resultados de trabalhos experimentais e de simulação computacional são os principais subsídios para o desenvolvimento dos modelos propostos. Devido à diversidade de parâmetros que potencialmente influenciam a condutividade térmica, o número de

modelos propostos e disponíveis na literatura é significativo, no entanto, segundo Oliveira (2010) até agora nenhum modelo conseguiu prever com exatidão o comportamento da condutividade térmica de diferentes suspensões de nanopartículas.

Basicamente, todos os modelos até agora disponíveis são derivações do modelo de Maxwell, modelo este, desenvolvido para determinar a condutividade elétrica ou térmica efetiva de suspensões sólido-líquido (MAXWELL, 1873). Este modelo é aplicável a suspensões sólido-líquido estatisticamente homogêneas e de baixa concentração em volume, com partículas esféricas de tamanho uniforme, aleatoriamente dispersas e sem contato. É um modelo que leva em consideração somente a concentração em volume de nanopartículas na suspensão,  $\theta$ , a condutividade térmica do fluido base,  $k_{fb}$ , e a condutividade térmica das nanopartículas,  $k_{np}$ . Assim, a condutividade térmica efetiva do fluido,  $k_{enf}$ , é dada por:

$$k_{enf} = \left( \frac{k_{np} + 2k_{fb} + 2(k_{np} - k_{fb})\theta}{k_{np} + 2k_{fb} - (k_{np} - k_{fb})\theta} \right) k_{fb} \quad (2.13)$$

Esse modelo é limitado para aplicações em nanofluidos, pois negligencia outros fatores tais como diâmetro, área superficial, geometria, movimento browniano, efeitos na interface sólido-líquido na superfície das nanopartículas, entre outros. Isso pode ser confirmado em comparando os resultados de diversos trabalhos experimentais, com aqueles previstos pelo modelo de Maxwell (Eq. (2.13)), que são sempre subestimados, isto é, o aumento real da condutividade térmica está além das previsões do referido modelo.

Desde que a idéia de dispersão de partículas em líquidos para melhorar a transferência de calor não é nova, os primeiros estudos para suspensões de partículas de tamanho micro foram realizados por Hamilton e Crosser (1962), Davis (1986) e outros.

Embora muitos modelos tenham sido apresentados, ainda existem fenômenos de transferência de calor nos nanofluidos que não são compreendidos. Nenhum dos modelos propostos consegue prever satisfatoriamente a condutividade térmica dos nanofluidos, e assim, a necessidade de mais dados experimentais e melhor entendimento do fenômeno físico é essencial para que se possa obter um modelo mais versátil e preciso.

Os modelos atuais para estimar a condutividade térmica de nanofluidos podem ser classificados em dois grupos gerais:

- (i) Modelos estáticos que assumem nanopartículas fixas no fluido base, nos quais a condutividade térmica é prevista pela condução e com base em modelos como de Maxwell, Hamilton-Crosser, Davis e Nan et al. (1997), utilizando a condutividade das fases constituintes e a fração em volume;
- (ii) Modelos dinâmicos tais como os propostos por Jang e Choi (2004) e Prasher et al. (2006), desenvolvidos com base no movimento aleatório das nanopartículas no fluido (movimento Browniano) tomado como responsável pelo transporte de energia através da colisão entre nanopartículas ou pela micro-convecção destas no interior do líquido onde aumenta a mistura e o transporte de energia térmica.

Alguns dos modelos básicos utilizados para estimar a condutividade térmica com base nas duas abordagens acima são mostrados na Tabela 2.2, onde  $k_{enf}$  é a condutividade térmica efetiva da mistura sólido-líquido,  $r_k = k_{np}/k_{fb}$ ,  $k_{fb}$  e  $k_{np}$  são a condutividade térmica do fluido base e das partículas, respectivamente;  $\psi$  e  $\theta$  são o fator de forma da partícula e a fração em volume de partículas, respectivamente;  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $\delta_T$  é espessura da camada,  $\beta = \frac{R_k k_{fb}}{R_2}$ , e  $R_k$  é resistencia Kapitza.

Tabela 2.2 – Modelos analíticos e empíricos para estimar a condutividade térmica de nanofluidos. Adaptada de (Singh (2008)).

Expressão	Pesquisador / Referência
$\frac{k_{enf}}{k_{fb}} = 1 + \frac{3(r_k-1)\theta}{(r_k+2)-(r_k-1)\theta}$	(MAXWELL, 1873)
$\frac{k_{enf}}{k_{fb}} = \frac{r_k+(\psi-1)-(1-r_k)\theta}{r_k+(\psi-1)+(1-r_k)\theta}$	(HAMILTON E CROSSER, 1962)
$\frac{k_{enf}}{k_{fb}} = 1 + \frac{3(r_k-1)\theta}{(r_k+2)-(r_k-1)\theta} [\theta + f(r_k) \theta^2 + \theta^3]$	(DAVIS, 1986)
$\frac{k_{enf}}{k_{fb}} = \frac{(r_k(1+2\beta)+2)+2\theta(r_k(1-\beta)-1)}{(r_k(1+2\beta)+2)-\theta(r_k(1-\beta)-1)}$	(NAN ET AL, 1997)
$k_{enf} = k_{fb} + (1 - \theta) + k_{np} \theta + \theta h \delta_T$	(JANG e CHOI, 2004)
$k_{enf}/k_{fb} = \{1 + A Re^m Pr^{0,333} \psi [2(1 - \theta)/(2 + \theta)]\}$	(PRASHER ET AL, 2006)

Entre os vários outros modelos analíticos propostos para determinar a condutividade térmica de nanofluidos alguns deles são uma tentativa de derivar uma equação com base na teoria. Segundo Assael et al. (2006) , os principais fatores considerados nas equações são a

condutividade térmica da fase dispersa e do fluido base, juntamente com a fração em volume de sólido em suspensão, entretanto algumas tentativas foram realizadas também para explicar as interações entre as partículas, porém, o aumento previsto por estes modelos é muito reduzido quando comparado com os resultados experimentais, pois estas equações não estavam destinadas a serem utilizadas para dispersões de nanoestruturas.

Kumar et al. (2004) apresentaram uma abordagem teórica levando em consideração o tamanho das partículas, o movimento das partículas, a concentração e a temperatura. Entretanto o modelo é criticado ao usar uma constante para incluir o efeito do tamanho das partículas, sem que, no entanto, esse parâmetro tenha sido mais detalhado. Embora seja, em geral, uma idéia promissora, importantes fatores não são considerados, tais como a resistência da interface ou a presença de dispersantes. Assael et al. (2006) destacam ainda os trabalhos de Wang et al. (2003) e Xuan e Li (2003) que abordam o nanofluido como uma rede, tendo em conta dimensões fractais e incorporando o movimento Browniano na equação.

Os nanotubos de carbono são nanopartículas de geometria singular, isto é, a elevada razão de aspecto, ( $L/d$ ), que os caracteriza e nomeia. No entanto, a maioria dos modelos considera partículas esféricas ou alongadas (elipsóide ou paralelepípedo). Talvez, esta necessidade óbvia de modelos correspondentes para nanofluidos contendo nanotubos tenha sido a motivação para que Nan e seus colaboradores tenham proposto um modelo específico para suspensões de nanotubos de carbono (NAN ET AL, 2003). Porém, segundo Assael et al. (2006), o reforço calculado foi maior que o observado experimentalmente para as suspensões de nanotubos, principalmente pela elevada condutividade térmica do material de carbono.

Como mencionado anteriormente, estimar a condutividade térmica de nanofluidos é um desafio importante para viabilizar aplicações futuras. No entanto, até o presente momento, os modelos propostos por diferentes grupos, principalmente para o cálculo da condutividade térmica de suspensões de nanopartículas com frações em volume da fase sólida relativamente pequenas, mostraram apenas um efeito menor sobre a condutividade térmica. Mais uma vez, acredita-se que mais fatores devem ser considerados, a fim de se obter uma melhor abordagem sobre o fenômeno. Portanto, está claro que mais trabalho é necessário para alcançar, teoricamente, uma equação base para a predição da condutividade térmica de nanofluidos.

## Viscosidade:

Embora a maioria dos trabalhos sobre nanofluidos encontrados na literatura aberta esteja focada no comportamento da transferência de calor e na busca por uma rota segura de preparação de suspensões homogêneas e estáveis, a viscosidade é uma importante propriedade dos nanofluidos. O aumento da condutividade térmica das suspensões de nanopartículas é diretamente proporcional à fração em volume de nanopartículas dispersas. No entanto, a concentração de nanopartículas afeta a viscosidade, então, espera-se conseguir aumentar a condutividade térmica dos nanofluidos sem que isso acarrete num aumento da perda de pressão, que está diretamente relacionada com a viscosidade do nanofluido. Os trabalhos publicados que abordam a viscosidade dos nanofluidos estão focados nos fatores que influenciam essa propriedade, ou seja, a concentração, o tamanho e a forma das nanopartículas bem como a temperatura dos nanofluidos. Entretanto, segundo Sommers e Yerkes (2009), alguns estudos têm sugerido uma insignificante queda de pressão para fluxo em dutos para ambos os regimes de fluxo laminar e turbulento, enquanto estudos como os de Kebinski et al. (2008) e Ghandi (2007), apontam que a concentração em volume de partículas necessária para alcançar o aumento desejado na condutividade térmica, também aumenta a viscosidade, o que torna o seu mérito para fluxo de resfriamento questionável.

Como pode ser observado, por exemplo, no trabalho de Prasher et al. (2006) que analisaram a viscosidade de nanofluidos de alumina e no trabalho de Chen et al. (2009) que analisaram a viscosidade de suspensões de nanotubos de titânio em etíleno glicol, existe desacordo em relação aos resultados. Prasher et al. (2006) afirmaram que a viscosidade relativa não dependia da temperatura nem do diâmetro das nanopartículas, mas da fração volumétrica das nanopartículas, enquanto Chen et al. (2009), por sua vez, demonstraram que os nanofluidos apresentam comportamento newtoniano em temperaturas entre 293 e 333 K e, portanto, concluíram que a viscosidade dependia fortemente da temperatura e da concentração de nanopartículas.

Estudos reológicos de nanofluidos encontraram tanto comportamento newtoniano (DING ET AL, 2006 e PUTRA ET AL, 2003) e comportamento pseudoplástico (HE ET AL, 2007, KOO E KLEINSTREUER, 2004 e XUAN E LI, 2003), no entanto, estes resultados estão vinculados à viscosidade do fluido base, à razão de aspecto das nanopartículas, à temperatura e condições de escoamento em que os testes foram realizados.

Tendo em vista a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor, é essencial deter-

minar sua viscosidade para calcular a queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor. Assim, viscosidade de nanofluidos também tem sido escopo de várias pesquisas envolvendo nanofluidos e alguns autores propuseram modelos para a predição da viscosidade de suspensões de partículas sólidas em matriz líquida (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Modelos analíticos e empíricos para estimar a viscosidade de nanofluidos.

Expressão	Pesquisador / Referência
$\mu_{nf} = (1 + 2,5\theta)\mu_{fb}$	(EINSTEIN, 1906)
$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{1-2,5\theta+1,552\theta^2}\right)\mu_{fb}$	(BRUIJIN, 1942)
$\mu_{nf} = (1 + 2,5\theta + 7,349\theta^2)\mu_{fb}$	(VAND, 1948)
$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{(1-\theta)^{2,5}}\right)\mu_{fb}$	(BRINKMAN, 1952)
$\mu_{nf} = (1 + 2,5\theta + 6,2\theta^2)\mu_{fb}$	(BETCHELOR, 1977)
$\mu_{nf} = (1 + 7,3\theta + 123\theta^2)\mu_{fb}$	(WANG <i>ET AL</i> , 1999)
$\mu_{nf} = (1 - 0,19\theta + 306\theta^2)\mu_{fb}$	(MAIGA <i>ET AL</i> , 2004 (b))
$\mu_{nf} = (0,904 e^{(0,1483\theta)})\mu_{fb}$	(NGUYEN <i>ET AL</i> , 2008)
$\mu_{nf} = (1 + 0,025\theta + 0,015\theta^2)\mu_{fb}$	(NGUYEN <i>ET AL</i> , 2008)
$\mu_{nf} = \left(e^{\left(\frac{4,91\theta}{(0,2092-\theta)}\right)}\right)\mu_{fb}$	(WILLIAMS <i>ET AL</i> , 2008)
$\mu_{nf} = \left(e^{\left(\frac{11,19\theta}{(0,1960-\theta)}\right)}\right)\mu_{fb}$	(WILLIAMS <i>ET AL</i> , 2008)
$\mu_{nf} = (1,005 + 0,479\theta - 0,1149\theta^2)\mu_{fb}$	(GODSON <i>ET AL</i> , 2010)

A maioria destes modelos é baseada na teoria de Einstein, que propôs um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Navier-Stokes (EINSTEIN, 1906).

Em geral, como pode ser observado, os modelos levam em conta a concentração em volume de partículas sólidas e a viscosidade do fluido base. No entanto, como a viscosidade do fluido base é fortemente dependente da temperatura, os modelos derivados para estimar a viscosidade são expressos como uma função do tipo:

$$\mu_{nf} = f(\theta, T) \quad (2.14)$$

onde,  $\theta$  é a concentração em volume de partículas e  $T$  é a temperatura de referência para a viscosidade do fluido base e consequentemente do nanofluido.

#### 2.5.4 Transferência de calor por convecção de nanofluidos

O coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos é quem melhor determina a sua utilidade prática como fluido de transferência de calor. Este parâmetro é fundamental para o projeto de sistemas de transferência de calor e, por isso, para fomentar as perspectivas de utilização de nanofluidos em processos térmicos com uma potencial diminuição do impacto ambiental e maior eficiência energética é necessário o profundo conhecimento do comportamento desse parâmetro.

Os nanofluidos apresentam um potencial para desempenho térmico superior ao dos fluidos secundários convencionais, muito embora ainda exista uma grande lacuna de informação e conhecimento quanto às aplicações que podem usufruir do desenvolvimento desta nova tecnologia. A aplicação de fluidos secundários de alto desempenho em sistemas de refrigeração poderia vir a se refletir em maior eficiência energética e na diminuição da área necessária para a transferência de calor e, consequentemente, do porte total do equipamento, o que resultaria na diminuição da carga volumétrica dos respectivos fluidos de trabalho e de seu correspondente impacto ambiental.

A tentativa de explicar os fenômenos envolvidos na transferência de calor nos nanofluidos tem mobilizado muitos pesquisadores. Além dos estudos enfocando a condução, a transferência de calor por convecção também tem sido foco de estudo de diversos grupos de pesquisa.

O estágio atual da tecnologia de nanofluidos trata de tentar dominar este conceito. Segundo Lee e Choi (1996), Choi introduziu a avançada tecnologia de arrefecimento que se baseia em microcanais e refrigerantes que contém partículas metálicas em escala nanométrica aplicando-a na refrigeração de um espelho de cristal de silício utilizado em fontes de raios X de alta intensidade. O sentido motivador da pesquisa era explorar as propriedades superiores dos nanofluidos em comparação com os fluidos de transferência de calor convencionais, bem como com fluidos contendo partículas metálicas de tamanho micrométrico.

A ideia básica da nova tecnologia de arrefecimento fundamenta-se no fato de que

a transferência de calor tem lugar na superfície da partícula. As nanopartículas têm áreas de superfície específica extremamente grande e, portanto, têm um grande potencial de aplicação na valorização da transferência de calor. Além disso, a maior área de superfície relativa das partículas nanométricas em relação à partículas convencionais de tamanho micro, resultam em maior capacidades de transferência de calor e melhoram, significativamente, a estabilidade das suspensões e as desvantagens tais como: a rápida precipitação das partículas sólidas, abrasão da superfície de troca de calor e entupimento dos canais de fluxo decorrentes da aplicação de suspensões de partículas com escala micro parecem ter sido contornadas.

No entanto, segundo Wang e Mujumdar ( 2007), o desenvolvimento e a aplicação da tecnologia de nanofluidos são dificultados por vários fatores tais como: a falta de concordância entre os resultados, as pobres caracterizações das suspensões e a falta de compreensão teórica dos mecanismos envolvidos na transferência de calor nos nanofluidos.

A abordagem mais frequente para a análise do comportamento termo-hidráulico dos nanofluidos se concentra na comparação dos resultados experimentais com os resultados teóricos previstos pelas correlações clássicas, onde são comparados os resultados experimentais encontrados com aqueles previstos pelas correlações, tanto para o fluido base quanto para os nanofluidos. Os resultados experimentais indicam que a transferência de calor varia com a velocidade do escoamento e com a concentração de nanopartículas na solução.

Além dos estudos enfocando as propriedades térmicas, físicas e reológicas dos nanofluidos, a transferência de calor por convecção também tem sido foco de estudo de diversos grupos de pesquisa, e alguns resultados podem ser encontrados nos trabalhos de Lee e Choi (1996), Pak et al. (1999), Xuan e Roetzel (2000), Li e Xuan (2002), Khanafer et al. (2003), Xuan e Li (2003), Wen e Ding (2004 (b)), Yang et al. (2005), Jang e Choi (2006) e Heris et al. (2007).

A maior parte dos estudos relatados mostra o aumento da transferência de calor por convecção forçada utilizando nanofluidos (LEE E CHOI, 1996, XUAN E ROETZEL, 2000, LI E XUAN, 2002, XUAN E LI, 2003, JANG E CHOI, 2006 e HARIS *ET AL*, 2007). Uns poucos estudos mostram inconsistências, ou seja, sob certas condições é relatado grande acréscimo na transferência de calor por convecção utilizando nanofluidos e, sob outras condições, pouco incremento na transferência de calor por convecção utilizando nanofluidos é relatado (PAK E CHO, 1999, CHEIN E CHUANG, 2007 e LEE E MUDAWAR, 2007). Existem também estudos

que mostram melhoramento pouco ou mesmo uma diminuição no coeficiente de transferência de calor por convecção quando nanopartículas são adicionados aos líquidos de base (YANG *ET AL*, 2005).

Nos tópicos a seguir, é apresentada uma breve revisão sobre os principais aspectos referentes às pesquisas sobre a transferência de calor em nanofluidos, com destaque para os aparatos experimentais utilizados, a redução dos dados e a apresentação dos resultados.

## **Aparatos experimentais**

Os aparatos experimentais desenvolvidos para a avaliação da transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos, em geral, seguem uma configuração que se assemelha aos sistemas convencionais de transferência de calor, no entanto, cada um é idealizado para atender condições específicas de ensaio conforme a proposta da pesquisa.

Basicamente todos os modelos de bancadas de ensaio encontrados na literatura constituem-se de: um reservatório, uma bomba, um sistema de estabilização de temperatura (pré-aquecedor), uma seção de testes (geralmente um tubo circular reto com diferentes diâmetros e de diferentes materiais) e um sistema de arrefecimento. Todas as bancadas levam em conta a necessidade de minimizar o volume de nanofluido empregado e de atender aos requisitos das condições de círculo estabelecidas, ou seja, o aparato deve ser capaz de operar, durante um período de tempo suficientemente grande em regime permanente, de modo a atingir o regime de escoamento (laminar ou turbulento) e as condições de fluxo de calor (temperatura constante da parede ou fluxo de calor uniforme pela parede), previstas no esboço da pesquisa.

Os esquemas de controle e operação dos aparatos são diversificados e estão, intimamente, relacionados com os dispositivos e componentes instalados no sistema e, principalmente, com o sistema de aquisição de dados utilizado.

No trabalho de Li e Xuan (2002), foi apresentado um sistema experimental destinado a investigar a transferência de calor por convecção e as características de fluxo do nanofluido em um tubo (Fig 2.7). Os principais componentes do sistema experimental são: um tanque reservatório, uma bomba, uma linha de sucção, uma seção de testes de transferência de calor, um refrigerador, uma seção de testes de queda de pressão e um tanque de recolhimento de fluidos.

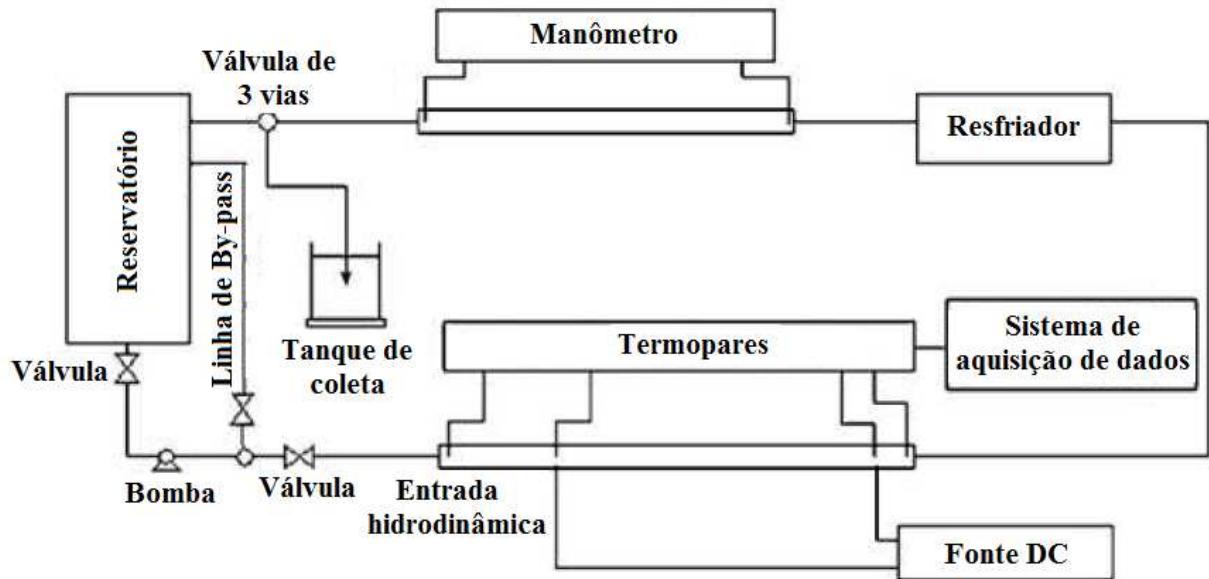


Figura 2.7 – Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (LI E XUAN, 2002).

A seção de teste de transferência de calor é um tubo de latão reto com um diâmetro interno de 10 mm e um comprimento de 800 mm. Para obter-se uma condição de contorno de fluxo de calor constante, a seção de testes de transferência de calor é aquecida eletricamente por uma fonte de alimentação DC capaz de proporcionar uma potência máxima de 3,5 kW. A taxa de fluxo é controlada com duas válvulas reguláveis, uma no circuito principal e a outra na linha de sucção. A taxa de fluxo é medida desviando-se o fluxo principal do reservatório para o tanque de recolha, pela manipulação de uma válvula de três vias instalada na extremidade do circuito de fluxo principal. Termopares foram montados em diferentes locais da seção de testes de transferência de calor para medir a temperatura da parede e a temperatura da massa de fluido.

O sistema experimental foi calibrado por comparação do número de Nusselt medido experimentalmente para a água no regime de fluxo turbulento totalmente desenvolvido com os valores calculados utilizando a correlação de Dittus-Boelter, apresentada na Eq. (2.15).

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}, \quad (2.15)$$

e, segundo os autores, dada a boa coincidência entre os resultados experimentais e os valores calculados, a precisão do sistema experimental é relativamente elevada.

Para investigar o efeito da concentração das nanopartículas sobre o aumento do de-

sempenho da transferência de calor dos nanofluidos Li e Xuan (2002), utilizaram nanofluido de  $Cu/H_2O$  em diferentes concentrações em volume de nanopartículas que é determinada a partir da fração de massa de nanopartículas. Segundo os autores, o número de Reynolds,  $Re$ , variou no intervalo de 800 até 25000.

Durante os ensaios experimentais, a temperatura da parede do tubo, a temperatura da amostra de nanofluido na entrada e na saída da seção de teste, a taxa de fluxo de massa e de insumo de energia elétrica eram medidas e, a partir destes dados, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi determinado conforme definido a seguir.

$$h_{nf} = \frac{\dot{q}}{T_w - T_f}, \quad (2.16)$$

em que  $\dot{q}$  é o fluxo de calor pela parede do tubo da seção de testes de transferência de calor,  $T_w$  é a temperatura média da parede do tubo. Segundo os autores,  $T_f$  é a temperatura média da massa fluida, totalizando a metade da soma das temperaturas de entrada e de saída, pois, no referido estudo, a diferença entre a temperatura de entrada e a de saída foi pequena.

O coeficiente de transferência de calor por convecção de cada tipo de nanofluido de  $Cu/H_2O$  com os diferentes números de Reynolds sob fluxo laminar e turbulento foi apresentado em diagramas  $h \times Re$ .

O arranjo experimental utilizado por Garg et al. (2009) para medir o coeficiente de transferência de calor por convecção é representado esquematicamente na Figura 2.8.

A seção de teste é constituída de um tubo de cobre em linha reta de 914,4 mm de comprimento, 1,55 mm de diâmetro interno e 3,175 mm de diâmetro externo aquecido por um conjunto de fios de nicromio 30 AWG enrolados sobre o tubo e ligados a uma fonte de alimentação de 1500 W, 000 – 300 V, 0 – 5 A DC. Quatro conjuntos de termopares foram montados na superfície da seção de testes em diferentes posições axiais a partir da entrada da seção para medir as temperaturas de parede. Dois termopares individuais foram montados, protegidos, e termicamente isolados em pequenos tubos de cobre localizados antes e após a seção de transferência de calor para medir a temperatura da massa de fluido na entrada e na saída da seção de transferência de calor.

Para validar a temperatura de saída do líquido, medida pelo termopar, o líquido foi

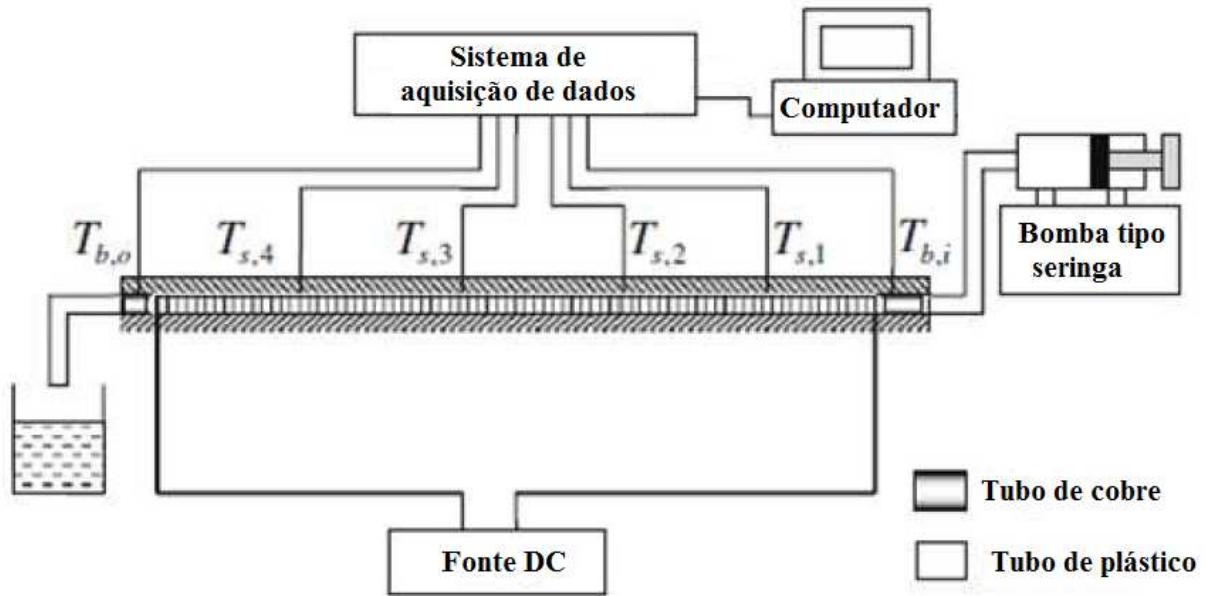


Figura 2.8 – Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (GARG ET AL, 2009).

coletado em um copo termicamente isolado e em condições de mistura a temperatura também foi medida. Uma bomba de seringa dosadora produziu as taxas de fluxo utilizadas de 40, 60 e 80 ml/min de forma que a condição de fluxo foi sempre laminar. O número de Reynolds para a água, correspondente a estas taxas de fluxo, foram cerca de 600, 900 e 1200, respectivamente. Os termopares e a saída da fonte de alimentação DC foram conectados a um sistema de aquisição de dados, conectado a um computador. O sistema experimental foi calibrado em condições de funcionamento tanto no âmbito isotérmico e de fluxo constante de calor, e fatores de correção foram aplicados a todas as medidas para dar medições dentro de 5 % de precisão.

O coeficiente de transferência de calor ( $h_{(x)}$ ) a uma distância axial  $x$  da entrada é definido como:

$$h_{(x)} = \frac{\ddot{q}_s}{T_{s(x)} - T_{b(x)}}, \quad (2.17)$$

onde:  $\ddot{q}_s$  é o fluxo de calor aplicado,  $T_{s(x)}$  é a temperatura da parede na posição  $x$  e  $T_{b(x)}$  é a temperatura da massa fluida na posição  $x$ .

O balanço de energia fornece  $T_{b(x)}$  na posição  $x$ :

$$T_{b(x)} = T_{b(i)} + \frac{\ddot{q}_s P}{\dot{m} c_p} x, \quad (2.18)$$

onde:  $T_{b(i)}$  é a temperatura da massa de líquido na entrada da seção de teste,  $P$  é o perímetro

do tubo de cobre,  $x$  é a distância axial a partir da entrada do seção de teste,  $\dot{m}$  é a taxa de fluxo de massa do fluido e  $c_p$  é o calor específico do fluido.

O fluxo de calor aplicado ao líquido pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\ddot{q}_s = \frac{\dot{m}c_p (T_{b(o)} - T_{b(i)})}{A}. \quad (2.19)$$

O coeficiente convectivo de transferência de calor também é definido sob a forma do número de Nusselt ( $Nu$ ), como:

$$Nu_{(x)} = \frac{h_{(x)} D_i}{k}, \quad (2.20)$$

onde:  $D_i$  é o diâmetro interior do tubo e  $k$  a condutividade térmica do fluido de teste.

Para os experimentos de transferência de calor, o fluxo de calor de  $6 \text{ kW/m}^2$  foi mantido constante. A presença de 0,25% de estabilizante tipo goma-arábica na água resultou em uma mudança insignificante no coeficiente de transferência de calor da água, em condições de fluxo laminar e, portanto, a água foi utilizada como fluido base para finalidades de comparação. No entanto, no caso de nanofluido de NTCs, como a viscosidade das amostras mudou sensivelmente com a temperatura e com a taxa de cisalhamento (devido ao comportamento não newtoniano), o número Reynolds encontrado para estas amostras variou dentro de um intervalo de  $\pm 100$ .

Os resultados foram apresentados como a variação do coeficiente convectivo de transferência de calor (das amostras e da água deionizada) em relação à distância adimensional  $x/D_i$  para diferentes números de Reynolds.

Segundo os autores, o coeficiente de transferência de calor laminar diminuiu com a distância axial. Para um fluido newtoniano puro, escoando no interior de um tubo de seção transversal circular, o fluxo é considerado hidrodinâmica e termicamente totalmente desenvolvido em  $x/D_i \geq 0,05 \cdot Re$  e  $x/D_i \geq 0,05 \cdot Re \cdot Pr$ , respectivamente. Uma vez que o fluxo tornou-se totalmente desenvolvido, o valor do coeficiente de transferência de calor se estabiliza para fluidos puros. Até um certo ponto, uma tendência semelhante foi observada para amostras de nanofluido de NTCs.

## Estudos analíticos da transferência de calor por convecção de nanofluidos

Como os resultados encontrados pelas correlações clássicas subestimam os valores de transferência de calor, os resultados experimentais são utilizados para derivar novas correlações para a previsão do coeficiente de transferência de calor.

Li e Xuan (2002) apresentaram o modelo de correlação para nanofluido em regime de fluxo laminar;

$$Nu_f = 0,4328 (1 + 11,285\phi^{0,754}Pe_d^{0,218})Re_f^{0,333}Pr_f^{0,4}. \quad (2.21)$$

O mesmo grupo de pesquisadores apresentou no trabalho de Xuan e Li (2000), o modelo de correlação para regime de fluxo turbulento, mostrado na Eq. (2.22),

$$Nu_f = 0,0059 (1 + 7,6286\phi^{0,6686}Pe^{0,001})Re^{0,9238}Pr^{0,4}. \quad (2.22)$$

Outras correlações para previsão do coeficiente de transferência de calor por convecção são apresentadas na Tabela 2.4

Tabela 2.4 – Modelos analíticos e empíricos para estimar a o número de Nusselt de nanofluidos.

Regime de fluxo	Correlação	Pesquisador / [Referência]
Turbulento	$Nu_f = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,5}$	(PAK E CHO, 1999)
Laminar (*)	$Nu_f = 0,086Re^{0,55}Pr^{0,5}$	(MAIGA ET AL, 2005)
Laminar (**)	$Nu_f = 0,086Re^{0,35}Pr^{0,36}$	(MAIGA ET AL, 2005)
Turbulento	$Nu_f = 0,085Re^{0,71}Pr^{0,35}$	(MAIGA ET AL, 2004 (a) )

Maiga et al. (2004 (a)) e Maiga et al. (2005) trabalharam com simulação computacional e deduziram as correlações da Tabela 2.4, onde  $Nu_f = 0,86Re^{0,55}Pr^{0,5}$  (\*) é modelo desenvolvido para escoamento em regime laminar e condição de contorno de fluxo de calor constante pela parede e  $Nu_f = 0,086Re^{0,35}Pr^{0,36}$  (\*\*) é o modelo para escoamento laminar e condição de contorno de temperatura constante na parede do tubo.

## 2.6 Nanofluidos de NTCs

Fluidos convencionais que são utilizados em processos de transferência de calor, como

o ar, hélio, água, óleo mineral, etileno-glicol e fluidos refrigerantes desempenham um papel importante numa série de setores industriais, incluindo geração de energia, produtos químicos, ar condicionado, transporte e microeletrônica. Estes fluidos, no entanto, são inadequados para aplicações de elevados fluxos de calor como supercondutores magnéticos, computação de alta velocidade e tubos de microondas de alta potência, devido à limitação de suas propriedades térmicas como a condutividade. Os nanofluidos surgiram das investigações realizadas com o objetivo de melhorar o desempenho térmico de fluidos usados em processos térmicos.

Conforme mencionado anteriormente, a incorporação de nanopartículas sólidas de alta condutividade térmica a uma base líquida, para incrementar a transferência de calor, resultou naquilo que foi denominado nanofluido (CHOI, 1995). Entre as vantagens advindas da suspensão de nanopartículas em fluidos destaca-se o fato de que são suspensões de elevada condutividade térmica e cuja estabilidade é superior a de suspensões convencionais. Além disso, está caracterizada a reduzida penalidade pelo aumento na queda de pressão e abrasão na parede do tubo em comparação com aquelas decorrentes da utilização de suspensões produzidas a partir de partículas de dimensões milimétricas ou micrométricas.

Segundo Choi et al (2001) desde a descoberta dos nanotubos de carbono, um número de propriedades físicas exóticas tem sido observado e, principalmente, pelo fato de muitos estudos mostrarem que os nanotubos de carbono têm condutividade térmica elevada (Tabela 2.1). Os pesquisadores estão trabalhando para explorar as propriedades térmicas únicas dos nanotubos de carbono para a produção de suspensões de alta condutividade térmica e descobriram fenômenos completamente inesperados, entre eles, destaca-se o fato de que a condutividade térmica das suspensões de nanotubos de carbono é substancialmente maior do que as previsões teóricas e a não linearidade da condutividade térmica com a concentração de nanotubos em suspensão.

### 2.6.1 *Preparação de nanofluidos de NTCs*

Os nanotubos de carbono estão sendo empregados na preparação de nanofluidos, especialmente, devido a sua elevada condutividade térmica, porém, a elevada razão de aspecto deste tipo de nanopartícula também tem despertado interesse.

Conforme o descrito anteriormente (Seção 2.4), os nanotubos são produzidos na forma

de pó, posteriormente purificados e, dependendo da aplicação, também podem ser funcionalizados química ou fisicamente. Além disso, são diversos os processos empregados na síntese e, consequentemente, variados os tipos de nanotubos de carbono produzidos, tanto em relação ao número de paredes, helicidade e dimensões.

Em detrimento do elevado número de parâmetros envolvidos na síntese, a especificação comercial dos nanotubos de carbono resume-se, exclusivamente, ao número de paredes e às características geométricas de diâmetro e comprimento. Sabe-se também que os nanotubos de carbono, produzidos na forma de pó, apresentam-se emaranhados e são altamente hidrofóbicos. Pelo exposto, não há, até o presente momento, uma rota segura para a preparação de nanofluidos de nanotubos de carbono, o que tem sido a motivação para muitos grupos de pesquisa.

Choi et al (2001), preparam as suspensões, pela técnica de dois pasos, a partir de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) que continham uma média de 30 camadas anelares, produzidos num reator de deposição de vapor químico (CVD), com xileno como a fonte primária de carbono e ferro para proporcionar o catalisador ferroceno. Os nanotubos de carbono foram dispersos em óleo sintético (poli alfaolefina), e, segundo os autores, as suspensões com fração em volume de nanopartículas de até 1%, eram bem dispersas e estáveis. De acordo com a análise, realizada pelos autores, as imagens de microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (HRTM) apresentaram MWCNTs metálicos, com diâmetro médio de  $25\text{ nm}$  e comprimento de  $50\text{ mm}$  (para uma razão de aspecto média  $r = 2000$ ). Os nanotubos, assim como produzidos, aparecem geralmente alinhados (Fig. 2.9).

No trabalho de Ding et al (2006) foram usados nanotubos de carbono de paredes múltiplas e água destilada para produzir os nanofluidos. Os nanotubos de carbono (NTCs) foram produzidos cataliticamente a partir de hidrocarbonetos em materiais nano-catalisadores sob altas pressões e foram utilizados como recebidos. Os nanotubos, em forma de pó, estavam emaranhados e alguns estavam formando aglomerados. Sabe-se que os NTCs têm uma superfície hidrofóbica, que são propensos a agregação e precipitação em água, na ausência de um dispersante/surfactante e, consequentemente, muitos esforços foram realizados pelos pesquisadores na busca de um dispersante adequado e optaram por utilizar goma-arábica como dispersante. Para separar os nanotubos e para quebrar aglomerados os autores utilizaram métodos que incluem a ultrasonicação, à seco, dos nanotubos de carbono e homogeneização da dispersão sob condições

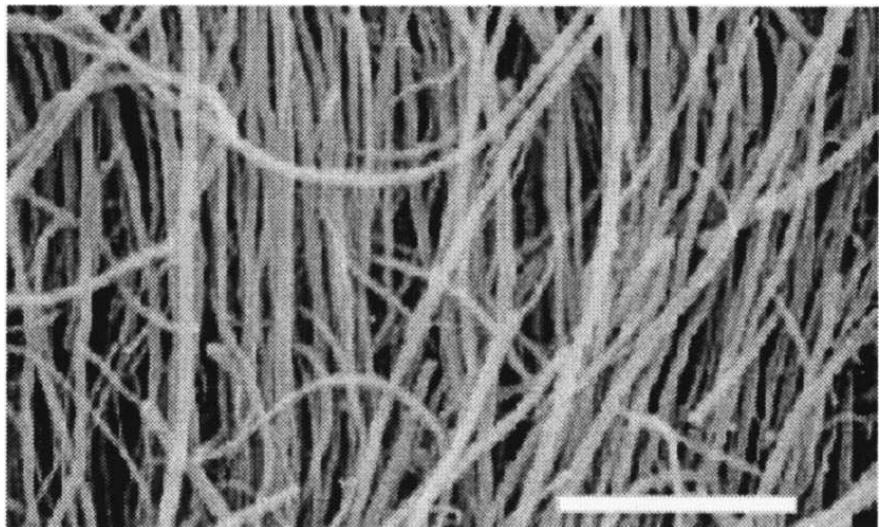


Figura 2.9 – Imagens HRTM de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (CHOI ET AL, 2001).

de intenso cisalhamento. A homogeneização foi realizada usando um Ultra-Turrax T25 mixer. O misturador tinha uma diferença de  $0,5\text{ mm}$  entre o rotor e o estator. A velocidade de rotação do rotor é ajustável e a velocidade mais alta foi  $24000\text{ rpm}$ , o que poderia proporcionar uma taxa de corte de até  $40.000\text{ s}^{-1}$  e oportunidades para quebrar aglomerados. Como resultado, os autores apresentam um processo típico para preparação de nanofluidos: (a) sonicação de uma amostra de NTCs com um peso conhecido em um banho de ultrassom por mais de 24 h, (b) dispersão dos nanotubos de carbono sonicados em uma quantidade predefinida de água destilada contendo goma arábica, (dispersante - GA), com ajuste do pH da suspensão para um nível pré estabelecido e (c) processar a mistura com o homogeneizador de alto cisalhamento por 30 min.

Empregando nanotubos de carbono de paredes múltiplas, produzidos por deposição de vapor químico (CVD), Ko et al. (2007), preparam amostras de nanofluidos de NTCs/ $\text{H}_2\text{O}$ , com concentrações de até  $2200\text{ ppm}$  (0,22 % vol), por intermédio de dois métodos diferentes, um utilizando surfactante SDS e outro através de funcionalização com introdução de oxigênio para agregar grupos funcionais na superfície dos NTCs por tratamento ácido. Segundo os autores, o surfactante SDS (dodecil sulfato de sódio) foi dissolvido em água destilada à taxa de 1,0 % em massa e, em seguida, a mistura resultante recebeu os nanotubos de carbono. Por sua vez, no tratamento ácido para modificar a superfície dos nanotubos, 1 g de nanotubos de carbono foi adicionada à 40 ml da mistura de ácido nítrico/sulfúrico e colocados para ferver em refluxo por 1 h. Em seguida, o produto foi diluído em água destilada, filtrada e lavada várias vezes até

que a água de lavagem não indicasse acidez. Os nanotubos coletados, foram então, limpos e secos a  $150^{\circ}C$  para a remoção da água, finalmente, os nanotubos de carbono, tratados, em pó, foram adicionados à água destilada. Nos dois casos, para facilitar a dispersão e produzir suspensões homogêneas foi, segundo os autores, utilizada intensa sonicação e os nanofluidos permaneceram estáveis após dois meses.

Amrollahi et al (2009) preparam nanofluidos de nanotubos de carbono com concentração em massa de nanopartículas,  $\phi$ , inferior a 1 %, foram produzidas pelo método de 2 passos através da dispersão de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs), com diâmetro médio de 3 nm, em água destilada (Fig 2.10).

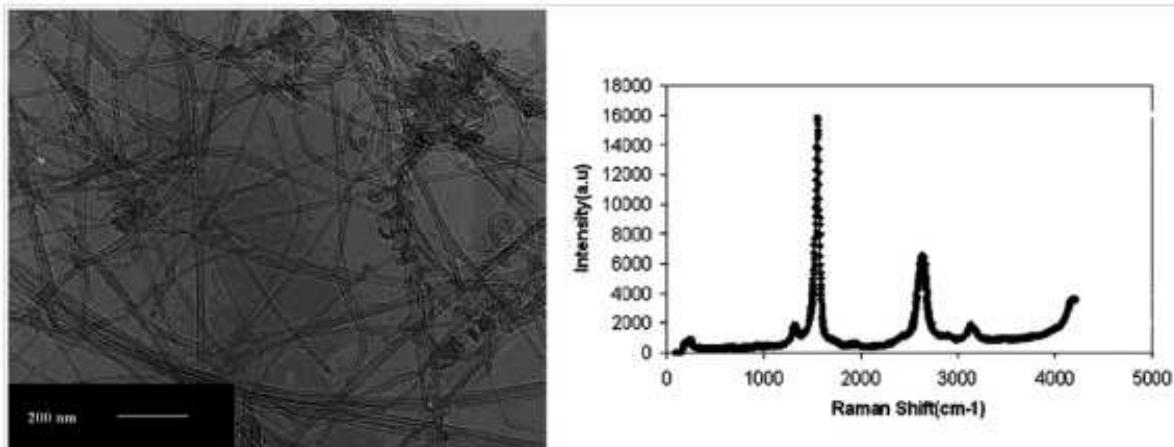


Figura 2.10 – (a) Imagens TEM de nanotubos de carbono; (b) espectroscopia Raman dos nanotubos de carbono (AMROLLAHI *ET AL*, 2009).

Segundo os autores o estudo do efeito de alguns fatores, tais como, a fração em massa, a temperatura, surfactantes, o valor do pH e a técnica de tratamento físico sobre o tamanho das nanopartículas em suspensão e sobre a dispersibilidade dos nanotubos em água é fundamental para que se desenvolvam sistemas de nanofluidos sendo, a preparação, essencial para a obtenção e reprodução estável das propriedades termofísicas e características superiores dos nanofluidos. Motivados pelo fato de que os métodos de preparação de nanofluidos estáveis, não foram, ainda, sistematicamente estudados, os autores, preparam as amostras em temperatura ambiente, empregando surfactante (dispersante) e ácido, para facilitar a dispersão, controlar o pH e estabilizar a amostra. O tratamento físico para a dispersão empregou a energia externa produzida por diferentes equipamentos, isto é, foram utilizados: agitadores (misturadores), sonicador em banho e disruptor ultrassônico com sonotrodo. O misturador, não produziu mudança significativa na

morfologia, no entanto, o banho de ultrassom e o disruptor de ultrassons reduziram significativamente o tamanho dos aglomerados e o número de partículas primitivas no aglomerado, sendo o disruptor ultrassônico o meio considerado mais eficaz para a dispersão, por ter sido capaz de fornecer energia suficiente para desaglomerar os clusters de partículas com forte impacto sobre os clusters de nanopartículas.

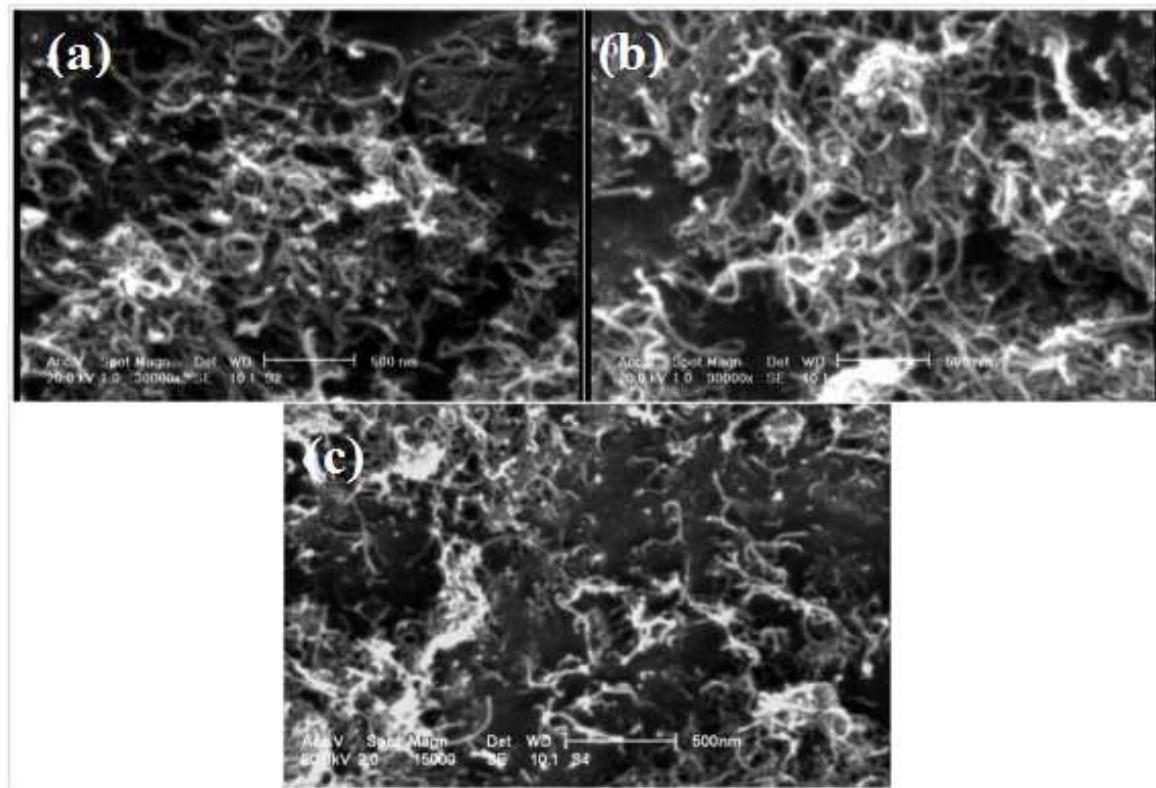


Figura 2.11 – Imagens MEV das nanopartículas do nanofluido de NTCs à base de água preparados por métodos de dois passos: (a) agitador (b) banho de ultra-sons (c) disruptor de ultra-sons (a barra de escala inserida é de 500 nm) (AMROLLAHI *ET AL*, 2009).

Além da análise por imagens de microscópio eletrônico de varredura (SEM) do nanofluido de SWCNTs/água destilada, mostrada na Fig. 2.11, medições do potencial zeta, medições da turvação (turbidez) e fotografias da sedimentação foram utilizados para caracterizar a estabilidade coloidal das dispersões e observar o efeito do tratamento físico sobre a morfologia das partículas em suspensão.

Rashidi e Mosaravi (2011) preparam nanofluido de MWCNTs (diâmetro médio externo de  $30-50\text{ nm}$ , diâmetro interno de  $5-15\text{ nm}$  e comprimento de  $10-20\text{ }\mu\text{m}$  com pureza de 95 %) em água deionizada com adição de GA (goma arábica) utilizando um agitador magnético e

ultrassom para auxiliar na dispersão, Garg et al. (2009) examinaram nanofluidos de MWCNTs a base de água em que a nanopartículas foram dispersas com ultrassom, Biercuk et.al (2002) relataram a adição de SWCNTs (nanotubos de carbono de parede simples não purificados) em epóxi industrial. Assael et al. (2004) dispersaram MWCNTs em água empregando dispersante SDS. Assael et al. (2005) e, Hwang et al. (2006) trabalharam com suspensões de MWCNT em água, bem como em etileno-glicol, Liu et al. (2005) estudaram suspensão de NTCs (MWCNTs de 20-50 nm de diâmetro) em etileno glicol, Yang et al. (2007) estudaram dispersões de MWCNTs (comprimento médio original e o diâmetro dos nanotubos foram cerca de  $50\ \mu m$  e  $100\ nm$ ) em óleo com PIBSI dispersante e uso de ultrasom, Assael et al. (2006) dispersaram MWCNTs (com um diâmetro médio de  $120\ nm$ ) em etileno glicol sem dispersante e com dispersante SDS (aniônicos), CTAB (catiônico), TRITON X – 100 (não iônico).

Como os nanotubos de carbono são fornecidos na forma de pó, a preparação de nanofluidos de NTCs é realizada pelo método de dois passos. Os nanotubos de carbono como fornecidos (na forma de pó), apresentam grande aglomeração, são altamente hidrofóbicos, exigindo, na sua preparação, o uso de energia externa extra e/ou o uso de emulsificante ou surfactantes para melhorar as características da dispersão. Alguns trabalhos apresentam o pré-tratamento dos NTCs em banho ácido, seguido de lavagem e secagem com o objetivo de quebrar os aglomerados e remover impurezas.

Kumaresan et al (2013) estudaram as características de transferência de calor de diferentes nanofluidos de NTCs durante o escoamento em um trocador de calor tubular. As amostras de nanofluidos com concentração em volume de 0, 15 %, 0, 30 % e 0, 45 %, foram produzidas pela dispersão de MWNTs ( $d = 30 - 50\ nm$  ;  $L = 10 - 20\ \mu m$ ;  $A_{sp} = 60\ m^2/g$  e pureza de 95 %) em uma mistura etileno-glicol e água (70 : 30 % em vol.) com a adição de 0, 1 % em vol. de surfactante (SDBS) em cada amostra. Imagem de miscrocópio eletrônico de varredura (SEM) dos MWNTs dispersos é mostrada na Fig. 2.12, e, segundo os autores, o diâmetro médio dos aglomerados de nanotubos é inferior a  $100\ nm$ . Os autores informam que as amostras de nanofluido preparadas permaneceram estáveis por mais de cinco meses, sem sedimentações visíveis.

Kumaresan et al (2013) apresentaram resultados experimentais da medição da densidade e do calor específico das amostras de nanofluido. A medida da densidade foi realizada à temperatura ambiente através da pesagem de uma amostra de fluido, num balão volumétrico

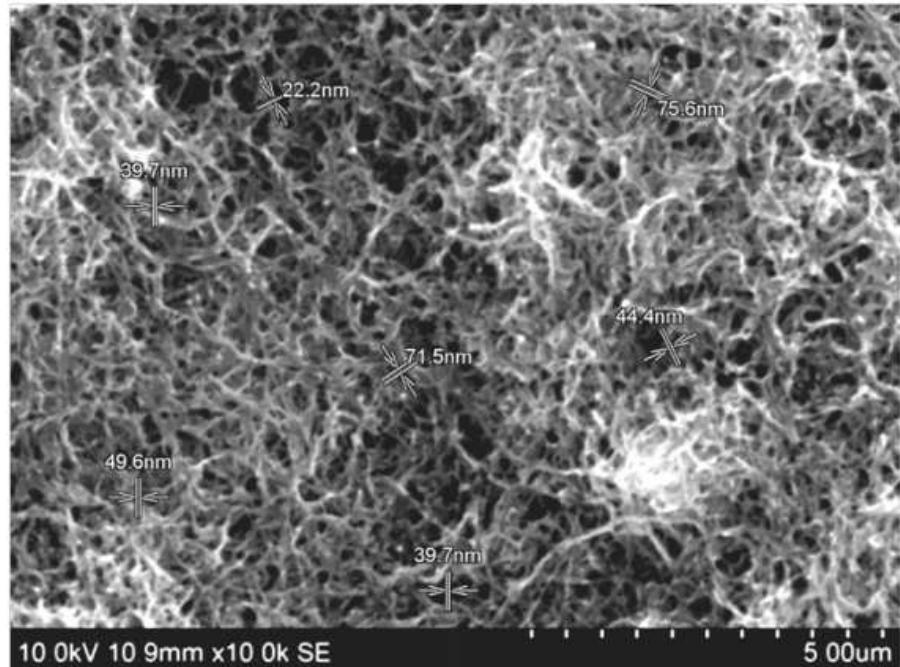


Figura 2.12 – Imagem SEM de MWCNTs dispersos (0.45 % vol.) (KUMARESAN *ET AL*, 2013).

padrão (classe A) de 25 *ml*, em uma balança eletrônica de alta precisão ( $\pm 0,002\text{ g}$ ). Por sua vez, o calor específico foi medido através de um calorímetro diferencial de varredura (*TA instrument, Q200*), no qual, a massa da amostra de nanofluido de 15 – 20 *mg* foi mantida num cadinho de alumínio, e a temperatura variou em rampa de  $-50^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$  à velocidade de exploração de  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ . É importante notar que, ao contrário dos resultados encontrados pela teoria da mistura, os autores encontraram que o calor específico da suspensão aumenta com o aumento da temperatura entre 0 e  $35^\circ\text{C}$  permanecendo praticamente constante a partir desta temperatura.

## 2.6.2 Viscosidade e condutividade térmica de nanofluidos de NTCs

### Viscosidade de nanofluidos de NTCs

A viscosidade de nanofluidos de NTCs a base de água foi avaliada, segundo a taxa de cisalhamento, por Ding et al. (2006) e concluíram que a viscosidade aumenta com a concentração de nanopartículas e com a diminuição da temperatura, como seria de esperar. Os pesquisadores também observaram um comportamento pseudoplástico, significando que os nanofluidos de NTCs podem melhorar o desempenho do escoamento com o aumento da tensão de cisalhamento nas paredes, resultando numa menor viscosidade quando em escoamento.

Ko et al. (2007) concluíram que os nanotubos tendem a se tornar altamente emaranhados quando dispersos em fluidos e isso contribuiu para o comportamento altamente viscoso dos nanofluidos em repouso ou sob fraca tensão de cisalhamento, porém, quando a tensão de cisalhamento é aumentada, os tubos tendem a arranjar-se ao longo da direção do fluxo e a viscosidade é reduzida. Por outro lado, o aumento da temperatura enfraquece as forças intermoleculares das partículas e do fluido, diminuindo assim a viscosidade. Os autores também concluíram que para baixas concentrações de nanopartículas, os incrementos na viscosidade são quase insignificantes. As amostras de nanofluidos de NTCs/água foram preparadas através de duas diferentes maneiras, uma utilizando surfactante tipo SDS e outra por intermédio de funcionalização com introdução de oxigênio para agregar grupos funcionais na superfície dos NTCs por tratamento ácido. A viscosidade das amostras de nanofluido de NTCs assim como produzidos e a partir de NTCs tratados foi medida utilizando viscosímetro AR2000 (*TA Instrument*) nas taxas de cisalhamento entre  $0,01$  e  $100\text{ s}^{-1}$ . Os autores apresentaram a viscosidade das amostras de nanofluidos como uma função da taxa de cisalhamento e observou-se o comportamento pseudoplástico para ambos os nanofluidos de NTCs. Com uma dada taxa de cisalhamento, a viscosidade da amostra de nanofluido, preparada a partir de NTCs em pó, sem tratamento, aumenta com o aumento da fração em volume de NTCs. Em reologia, é sabido que no fluxo de soluções de polímero, estruturados como fios, que inicialmente são complexamente emaranhadas, são reorganizadas na direção do fluxo sob a tensão de cisalhamento e, consequentemente, diminui a viscosidade da solução com a taxa de cisalhamento. Considerando a semelhança estrutural entre polímeros e nanotubos de carbono, Ko et al. (2007) especulam que o comportamento não-newtoniano de nanofluidos de NTCs poderia ocorrer devido ao rearranjo dos NTCs sob a tensão de cisalhamento. Em outras palavras, os NTCs em nanofluidos são emaranhados e causam comportamento altamente viscoso dos nanofluidos em repouso ou sob fraca tensão de cisalhamento. Quando a tensão de cisalhamento torna-se mais forte, ao contrário disso, eles ficam dispostos ao longo da direção do fluxo e a viscosidade do nanofluido é reduzida.

Alias e Wei (2009) sintetizaram amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono (NTCs/DI e NTCs/EG) pelo método de duas etapas empregando banho ultrassônico e utilizando surfactante SDS para auxiliar a dispersão. Foram avaliados o efeito da fração em peso de partículas,  $\theta$ , e da temperatura sobre a viscosidade dos nanofluidos de NTCs. Os valores da viscosidade

relativa obtidos experimentalmente foram comparados com o modelo de Einstein, (Eq. (2.23)), para a viscosidade efetiva de suspensões muito diluídas, que relaciona a viscosidade relativa à sua fração em volume de partículas e é mostrada como:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = 1 + 2,5 \theta \quad (2.23)$$

Os autores relataram que para ambos os fluidos base, a viscosidade aumenta com a concentração de partículas e diminui com o aumento da temperatura entre 30 e 60 °C. No entanto, para as amostras de nanofluidos a base água deionizada (DI) a viscosidade aumentou de forma não-linear com a concentração de partículas, confirmando mais uma vez que o cisalhamento interno viscoso aumenta com a concentração de nanopartícula, o que resulta em maior viscosidade do fluido.

No trabalho de Kumaresan et al (2013), a medida da viscosidade foi realizada utilizando um reômetro (*Bohlin CVO rheometer*) com uma precisão de mais de  $\pm 0,004\%$ , no intervalo de temperatura de 0 – 40 °C, com um passo de 5 °C.

## Condutividade térmica de nanofluidos de NTCs

O grande potencial dos nanofluidos em aumentar a eficiência do transporte térmico tem motivado investigações sobre nanofluidos contendo nanotubos de carbono, especialmente, devido à sua condutividade térmica (Tabela 2.1).

A eficiência e a aplicabilidade dos nanofluidos, estão relacionadas com o seu elevado coeficiente de transferência de calor e, especialmente, a elevada condutividade térmica. Entre os parâmetros que afetam esta propriedade, os mais citados e investigados são: o tamanho, a forma e a natureza das nanopartículas, a técnica de preparo da suspensão (surfactantes, potência, o tempo de sonicação e o tempo decorrido após concluir o processo de sonicação), o pH, a temperatura, a concentração de partículas e a concentração de surfactante. Segundo a literatura, alguns destes parâmetros podem ter efeitos de interação e, também tem sido mostrado que os fatores, cujo os efeitos sobre a condutividade térmica e a estabilidade são significativos, não são precisamente semelhantes uns aos outros, e em alguns casos, concorrentes.

A Tabela 2.5 descreve alguns resultados do incremento da condutividade térmica para nanofluidos de nanotubos de carbono, de acordo com as informações encontradas na literatura.

Tabela 2.5 – Nanofluidos de nanotubos de carbono e respectivo aumento da condutividade térmica da suspensão em relação a condutividade térmica do fluido base conforme relatado na literatura.

Nanofluido $\phi$ vol%	Tamanho (nm)	Acresc. $k$ (%)	Referência
MWCNTs/Óleo 1,0 %	$25 \times 50 \mu m$	250	(CHOI ET AL, 2001)
SWCNTs/Epóxy 1,0 wt %	3 – 30	125	(BEIRCUK ET AL, 2002)
NTCs/ $H_2O$ 1,0 %	$15 \times 30 \mu m$	7	(XIE ET AL, 2003)
NTCs/EG 1,0 %	$15 \times 30 \mu m$	12,7	(XIE ET AL, 2003)
NTCs/Deceno 1,0 %	$15 \times 30 \mu m$	19,6	(XIE ET AL, 2003)
SWCNTs/Epóxy 1,0 wt %	$20 \times 200 \mu m$	300	(CHOI ET AL, 2003)
NTCs/ $H_2O$ 0,84 %	$200 – 600 \mu m$	31	(WEN E DING, 2004 (a))
MWCNTs/ $H_2O$ 0,6 %	$130 \times 10 \mu m$	34	(ASSAEL ET AL, 2004)
NTCs/EG 1,0 %	20 – 50	12,4	(LIU ET AL, 2005)
NTCs/Óleo 2,0 %	20 – 50	30	(LIU ET AL, 2005)
MWCNTs/ $H_2O$ 0,25 – 2,0 %	50 – 80	100	(PONMOZHI ET AL, 2010)
MWCNTs/EG 1,5 %	50 – 80	17	(LAMAS ET AL, 2010)

Os nanofluidos de nanotubos de carbono têm apresentado maior aumento na condutividade térmica, confirmando as primeiras medições realizadas por Choi et al. (2001), em que investigaram a condutividade térmica de nanofluidos produzidos pela dispersão de MWCNTs (*multiwalled carbon nanotubes*) em óleo (polialfaolefina).

Segundo Choi et al. (2001) a condutividade térmica medida é muito superior às previsões teóricas e é não-linear com a concentração de nanotubos. Os fenômenos anômalos mostram os limites fundamentais dos modelos convencionais de condução de calor para suspensões sólido-líquido. Os autores sugerem a abordagem de outros conceitos físicos para a compreensão do comportamento térmico anômalo de suspensões de nanotubos, pois, o aumento medido na

condutividade térmica, para uma concentração de 1,0 % em volume de nanotubos em óleo foi de 160 %, enquanto que a melhoria prevista pelos modelos teóricos apresentados na tabela Tabela 2.2 foi inferior a 10 %.

Os resultados apresentados por Xie et al. (2003) indicaram que a condutividade térmica aumenta com a fração em volume de nanotubos e decresce com o aumento da condutividade térmica do fluido base. A indicação de que são os aglomerados (clusters) de nanotubos de carbono os responsáveis pelo aumento na transferência de calor é encontrada no trabalho de Biercuk et al. (2002) em que descreveram a medição da condutividade térmica de suspensões de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs - single wall carbon nanotubes) com uma fração em peso de 1% em epoxy e relataram um aumento de 125 %.

O efeito da temperatura na condutividade térmica de nanofluidos de MWCNTs a base de água foi descrito por Wen e Ding (2004 (a)) e indicaram que para temperaturas inferiores a 303,15 K a condutividade varia linearmente com a temperatura, entretanto para temperaturas acima de 303,15 K, essa dependência não se verifica. Ding et al. (2006) também relataram que a condutividade térmica dos nanofluidos de NTCs a base de água aumenta com a temperatura, mas seus resultados foram um pouco superiores aos encontrados por Xie et al. (2003), Assael et al. (2004), Wen e Ding (2004 (a)), porém inferiores aos reportados por Choi et al. (2001).

Um nanofluido de NTCs a base de água, preparado sem o uso de dispersante, porém com o pré-tratamento em banho ácido e posterior dispersão com ultrassom, foi avaliado por Ponmozhi et al. (2010) e os resultados obtidos demonstraram que o aumento da condutividade térmica foi proporcional a fração em volume de nanotubos, com valores máximos acima de 100 % para a temperatura de 333,15 K, independentemente da fração volumétrica testada.

Lamas et al. (2010) avaliaram o nanofluido de MWCNTs a base de etileno glicol com concentração em volume de 1,5 % e registraram um aumento de 17 % na condutividade térmica. Relataram, ainda, que o aumento da viscosidade para todas as concentrações e que com uma avaliação da estabilidade, concluíram que as suspensões permaneciam estáveis após 100 h depois de preparadas.

Assael et al. (2006) estudaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos utilizando o método de fio quente transiente e mostraram que um aumento significativo pode ser obtido. Além das medições, os autores discutem os métodos de medição existentes e as

correlações para a previsão da condutividade térmica.

Um resumo dos resultados das medições da condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono à base de água, de um estudo, conduzido por Assael et al. (2006) é mostrado na Tabela 2.6. Segundo os autores, a condutividade térmica do nanofluido foi medida com o método de fio quente transiente apresentando incerteza inferior a 2%.

Tabela 2.6 – Resumo dos resultados das medições de condutividade térmica de nanofluidos realizadas pelo grupo de Assael et al. (2006).

Fluido	Nanopartícula	Dispersante	Max. $k_{nf}/k_{fb}$
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (novo)	SDS 0,1% mas.	39
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (novo)	SDS 0,5% mas.	23
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (novo)	SDS 2% mas.	30
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (novo)	SDS 3% mas.	28
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (cond.)	SDS 1,1% mas.	12
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (cond.)	SDS 1,5% mas.	8
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol (cond.)	SDS 2% mas.	7
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	CTAB 0,1% mas.	19
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	CTAB 1% mas.	34
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	CTAB 3% mas.	34
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	CTAB 6% mas.	28
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	T X – 100 0,17% mas.	11
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	T X – 100 0,35% mas.	12
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	T X – 100 0,5% mas.	13
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	T X – 100 1% mas.	11
$H_2O$	MWCNTs 0,6% vol	N 0,7% mas.	28

Na tentativa de compreender os mecanismos de transferência de calor nos nanofluidos aquosos contendo nanotubos de carbono (multi-walled carbon nanotubes - MWCNTs), Assael et al. (2006) realizaram simulações iniciais empregando os Elementos Finitos (MEF) e os resulta-

dos obtidos foram, segundo os autores, muito encorajadores, pois observando os resultados das simulações 2D-FEM, foi possível distinguir as características desejadas para o projeto ótimo de um nanofluido.

O etileno glicol e a água foram selecionados como fluido base, porque eles são amplamente utilizados em aplicações de transferência de calor. Nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) foram empregados como fase dispersa na maioria dos casos, uma vez que eles são mais propensos a serem usados em várias aplicações de nanofluidos para aumento da transferência de calor, devido à sua maior condutividade térmica e menor preço. Além disso, vários dispersantes foram utilizados para auxiliar a formação de suspensões homogêneas e estáveis.

### 2.6.3 *Transferência de calor por convecção de nanofluidos de NTCs*

O estudo da transferência de calor por convecção de suspensões de nanotubos de carbono (nanofluidos de NTCs) decorre, principalmente da alta condutividade térmica dos nanotubos de carbono ( $\cong 3000 \text{ W/mK}$  para nanotubos de carbono de paredes múltiplas (KIM *ET AL*, 2001) e  $\cong 6000 \text{ W/mK}$  para nanotubos de carbono de parede única (BERBER *ET AL*, 2000) e, portanto, do grande potencial para aumento da transferência de calor.

Segundo Ding et al. (2006) o significativo acréscimo na transferência de calor por convecção de nanofluidos de NTCs depende das condições de fluxo (número de Reynolds,  $Re$ ), da concentração de nanopartículas ( $\theta$ ) e do  $pH$  da suspensão. Dadas outras condições, o aumento na transferência de calor é uma função da distância axial a partir da entrada, aumentando num primeiro momento, atingindo um máximo e depois diminuindo com o aumento da distância axial. A posição axial de máximo reforço aumenta com a concentração de NTCs e com o  $Re$ . Assim, para uma concentração de NTCs e certo nível de  $pH$ , parece haver um  $Re$  acima do qual ocorre um grande aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção. Um aumento tão grande parece corresponder ao comportamento pseudoplástico. Para nanofluidos contendo 0,5 % *wt.* de NTCs, a intensificação máxima atinge mais de 350 % em  $Re = 800$ , que não pode ser atribuído exclusivamente à melhoria da condução térmica. Segundo os autores, o rearranjo das partículas induzido pelo cisalhamento, o reforço da condução térmica, a redução da camada limite térmica devido à presença de nanopartículas, bem como a elevada razão de aspecto dos nanotubos de

carbono são propostos como possíveis mecanismos de intensificação da transferência de calor.

O sistema experimental empregado por Ding et al. (2006), para medir o coeficiente convectivo de transferência de calor está representado esquematicamente na Figura 2.13. Consiste em um circuito de fluxo, uma unidade de calor, uma parte de refrigeração e uma unidade de medição e controle. O circuito de fluxo inclui uma bomba com um medidor de fluxo (vazão), um reservatório, um tanque de coleta e uma seção de teste. Um tubo de cobre reto (com, 970 mm de comprimento, 4,5 mm de diâmetro interno e 6,35 mm de diâmetro externo) foi utilizado como seção de testes.

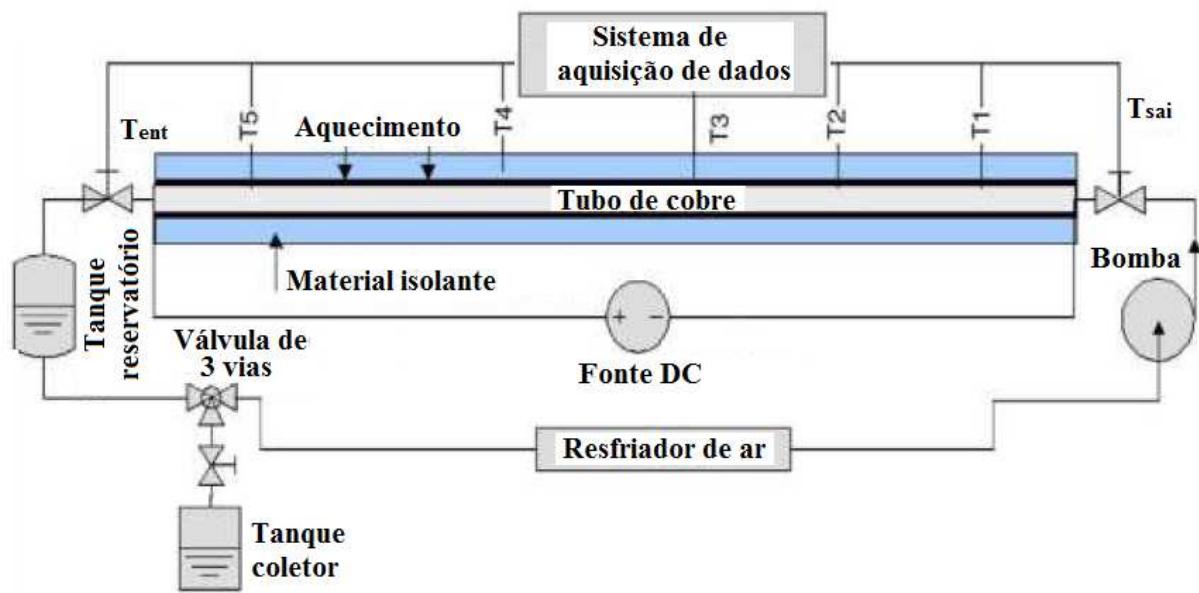


Figura 2.13 – Sistema experimental da transferência de calor por convecção e características de fluxo para o nanofluido, (DING ET AL, 2006).

A seção de teste era aquecida por um aquecedor flexível de silicone, ligado a uma fonte de alimentação DC. A alimentação era ajustável e tinha uma fonte de alimentação máxima de 300 W. Havia uma espessa camada de isolamento térmico em torno do aquecedor para obter uma condição de fluxo de calor constante ao longo da seção de teste. Cinco termopares tipo T foram montados na seção de teste na posição axial em mm de 118 ( $T_1$ ), 285 ( $T_2$ ), 524 ( $T_3$ ), 662 ( $T_4$ ) e 782 ( $T_5$ ) da entrada da seção de teste para medir a distribuição da temperatura da parede, e mais dois termopares tipo T foram inseridos no fluxo na entrada e na saída da seção de teste para medir as temperaturas da massa de nanofluido. A bomba utilizada neste trabalho era do tipo peristáltica com fluxo (vazão) controlado pela velocidade de rotação. A vazão máxima que a bomba poderia entregar era de 10 L/min. Havia uma válvula de três vias no circuito de

fluxo para calibrações da vazão e limpeza do sistema de fluxo.

Nos experimentos de transferência de calor, a taxa de rotação da bomba, voltagem e corrente da fonte de alimentação DC foram gravadas e as leituras de temperatura a partir dos 7 termopares foram registradas por um sistema de aquisição de dados. Como o desempenho da bomba foi sensível à viscosidade do fluido em uma determinada velocidade de rotação, a calibração foi necessária, o que foi realizado antes e após cada experimento através de um método de pesagem. Isso forneceu uma precisão na vazão de nanofluidos melhor do que 4,6 %. Os termopares foram calibrados em um termostato de banho de água e a precisão encontrada foi de 0,1  $K$ .

A tratamento dos dados e a apresentação dos resultados no trabalho de Ding et al. (2006) foram idênticos ass utilizados no trabalho de Garg et al. (2009), conforme descrito anteriormente.

O diagrama esquemático mostrado na Fig. 2.14 corresponde ao equipamento experimental desenvolvido por Kumaresan et al (2013). Ele consiste de uma seção de teste, o circuito fechado de nanofluido, o circuito fechado de água e o sistema de aquisição de dados. A seção de teste é um trocador de calor tubular de contra-fluxo concêntrico de 2,5 m de comprimento, em que o nanofluido escoa pelo tubo liso interior de cobre, com um diâmetro interno de 10,7 mm, enquanto que a água (fluido de aquecimento), escoa no espaço anular entre o tubo externo com um diâmetro exterior de 25,4 mm e o interno. A seção de teste foi dividida em cinco seções iguais e a seção inteira é revestida com o material isolante (espuma de borracha), encapsulada em uma caixa de madeira preenchida de lã de vidro. Os RTDs ( PT 100 ) foram inseridos diretamente no fluxo de fluido à entrada e à saída de cada seção, para medir a temperatura interna do nanofluido e da água.

A precisão e confiabilidade do equipamento experimental, foram avaliadas, por intermédio da comparação dos resultados experimentais levantados para água deionizada, com aqueles resultados previstos a partir da equação Shah (Eqs. (2.24) e (2.25)) para o fluxo laminar. Sob condições de fluxo turbulento os valores experimentais foram comparados aos valores previstos usando a equação de Gnielinski. Assim, os autores informaram que os resultados experimentais

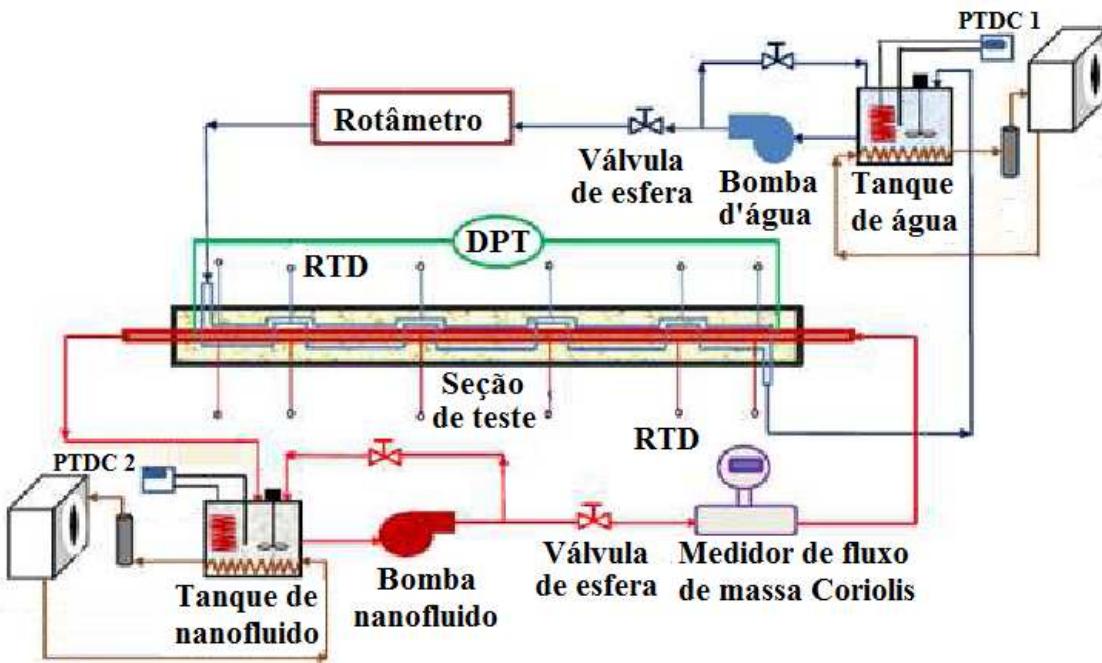


Figura 2.14 – Diagrama esquemático da configuração experimental (KUMARESAN *ET AL*, 2013).

estão em boa concordância ( $\pm 5$  para 12,5 %), com os valores advindos das correlações.

$$Nu_{(w)} = 1,953 \left[ Re Pr \left( \frac{D_i}{x} \right) \right]^{1/3} \quad \left( Re Pr \frac{D_i}{x} \right) \geq 33,33, \quad (2.24)$$

e

$$Nu_{(w)} = 4,364 + 0,0722 Re Pr \left( \frac{D_i}{x} \right), \quad \left( Re Pr \frac{D_i}{x} \right) < 33,33, \quad (2.25)$$

Entre os resultados apontados pelos autores, é importante destacar que para a suspensão com concentração em volume de nanopartículas de 0,45 %, o aumento do número de Prandtl, foi de 115,8 % e 180,2 % em temperaturas de 0 °C e 40 °C, respectivamente, porém, para todas as amostras, o número de Prandtl diminuiu com o aumento da temperatura e isto é atribuído ao substancial decréscimo da viscosidade dos nanofluidos com o aumento da temperatura. Segundo os autores, a diminuição da viscosidade tem efeito dominante e supera os efeitos do aumento do  $c_p$  e da condutividade térmica com o aumento da temperatura. Também foi apontado que o aumento da concentração de nanotubos de carbono diminui o número de Reynolds, no entanto o número de Nusselt aumenta com a diminuição do número de Reynolds. Isto é devido à maior intensificação na difusividade dinâmica em comparação com o melhoramento na difusividade para todos os nanofluidos. Em condições específicas de ensaio, ( $T_{nf} = 0^\circ\text{C}$  e  $T_w = 15^\circ\text{C}$ ), a me-

lhoria no coeficiente de transferência de calor para o nanofluido com 0,15 % vol. MWCNT em  $x/Di = 93,46$  foi 92 %, enquanto o nanofluido contendo 0,45 % de MWCNTs mostrou um aumento de aproximadamente 150 %. É também observado que o coeficiente de transferência de calor por convecção diminui com o aumento do comprimento adimensional da secção de ensaio ( $x/Di$ ). Este aprimoramento diminuiu de 92 % a aproximadamente 24 % para o nanofluido com a concentração de MWCNTs de 0,15 % vol., e de 150 % a 137 % para o nanofluido com 0,45 % vol. de MWCNTs com  $x/Di$  aumentando de 93,46 a 233,64.

Kumaresan et al (2013) ressaltaram que, à exceção da amostra com concentração em volume de nanotubos de 0,15 %, o comprimento de entrada térmica é encurtado em comparação com o fluido base. Conclui-se que, para essas amostras, há um aumento na espessura da camada limite térmica. A razão possível para a valorização anormal do coeficiente de transferência de calor para o menor comprimento da seção de teste é, devido ao fato de que a presença de MWCNTs cria uma ação de turbulência próxima a parede devido à migração dos nanotubos de carbono, impedindo que a camada limite térmica se desenvolva mais rapidamente. A tendência semelhante foi relatada por Xuan e Li (2003) para nanofluidos de cobre/água com base em regime turbulento, por Wen e Ding (2004 (b)) para nanofluidos de alumina baseados em água, e por Anoop et al. (2009) para nanofluidos alumina à base de água com partículas de diferentes tamanhos. Foi, ainda, registrado pelos autores que o efeito da velocidade de escoamento no incremento no coeficiente de transferência de calor por convecção foi mais elevado, no caso das amostras de nanofluido do que no fluido base.

# CAPÍTULO III

## EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Introdução

Com o objetivo de avaliar o desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono, o equipamento experimental foi projetado e construído de tal forma que fosse possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção e a perda de carga do fluido escoando em regime turbulento monofásico no interior de tubo circular reto e horizontal sob a condição de contorno de fluxo uniforme de calor na superfície.

O conhecimento teórico sobre aplicações de aquecimento e resfriamento com escoamento de gases e líquidos está bem sedimentado, entretanto soluções teóricas só são obtidas em alguns casos simples, sendo que o cálculo do coeficiente de transferência de calor e do coeficiente de atrito envolvem correlações empíricas.

O equipamento experimental, portanto, deve possuir os atributos necessários para que se estabeleçam as condições fluidodinâmicas e térmicas necessárias para atender as hipóteses e exigências teoricamente estabelecidas para a solução analítica e/ou experimental do problema em questão. Neste sentido, o presente capítulo apresenta uma descrição dos componentes que constituem o equipamento experimental e, também, é apresentado o procedimento experimental.

### 3.2 O Equipamento Experimental

De maneira geral, a literatura aberta oferece ampla teoria que ilustra as variáveis físicas mais importantes que afetam a perda de carga e a transferência de calor por convecção forçada turbulenta para fluidos que se deslocam em um tubo ou duto longo. Da mesma forma, ela contém as hipóteses e o equacionamento geral necessário para a análise do escoamento turbulento monofásico de fluidos no interior de duto circular horizontal sob a condição de contorno de fluxo específico de calor uniforme na superfície do tubo. O equipamento experimental foi projetado para atender às hipóteses e os requisitos de medição dos parâmetros e variáveis térmicas e hidráulicas pertinentes para a determinação do coeficiente de transferência de calor e o fator de atrito.

Devido às restrições inerentes à análise experimental, tais como o limitado volume das amostras de fluido disponíveis para análise, as limitações operacionais dos dispositivos e componentes comerciais disponíveis e a limitada capacidade construtiva, o equipamento experimental, cuja estrutura e funcionamento são descritos a seguir, foi desenvolvido para atender os objetivos inicialmente propostos para esse trabalho.

Nas seções seguintes são descritos os principais circuitos, componentes e dispositivos do equipamento experimental. Atenção especial é dada à seção de teste, cuja missão principal é reproduzir as hipóteses experimentais teoricamente definidas.

#### 3.2.1 Seção de teste

A seção de teste é constituída de um tubo circular de latão (fornecido por Termomecânica S/A) com diâmetro interno de  $6,35\text{ mm}$  e espessura de parede de  $3,17\text{ mm}$  com comprimento total de  $2480\text{ mm}$ .

Com o objetivo de medir a temperatura da parede do tubo, considerado um dos parâmetros mais importantes, termopares tipo T, Cobre-Constantan, modelo AWG30 (fornecidos pela OMEGA ENGINEERING, INC.), foram fixados nas ranhuras confeccionadas no tubo em diferentes posições a partir da entrada da seção de teste, conforme mostrado na Fig. 3.1. Nesse sentido, vários cuidados foram adotados para fixar o termopar na superfície externa do tubo. Tais ranhuras, com  $2\text{ mm}$  de profundidade permitiram a fixação dos termopares tipo T, em diferen-

tes posições axiais a partir da entrada da seção de teste. Os doze termopares denominados de T01 até T12 foram fixados em 108, 407, 408, 706, 1007, 1007, 1309, 1611, 1610, 1907, 2206, 2206 mm, distantes da seção de entrada, respectivamente. Os conjuntos de termopares (T02; T03), (T05; T06), (T08; T09) e (T11; T12), foram instalados na mesma posição axial, porém em diferentes quadrantes do tubo com o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrer gradientes de temperatura na circunferência da parede do tubo.

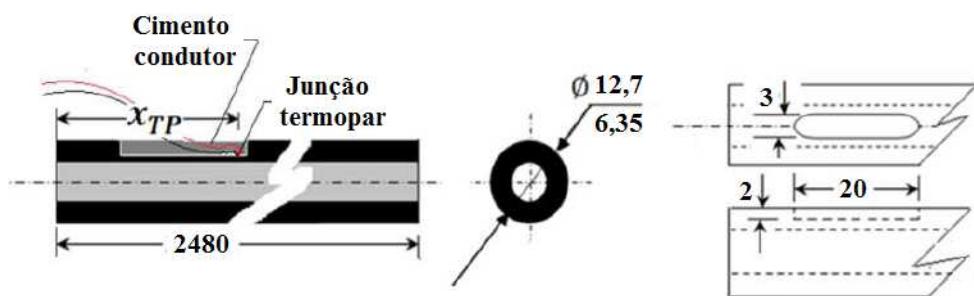


Figura 3.1 – Tubo da seção de teste, ilustrando as ranhuras para fixação dos termopares.

Os termopares foram fixados, inicialmente, com uma pequena quantidade de cola e, posteriormente, foram recobertos com uma camada de cimento condutor tipo CCC 60 - OMEGA (fornecido por OMEGA ENGINEERING, INC) até preencher completamente a ranhura. Uma vez curada a camada de cimento, o excesso foi removido manualmente com auxílio de lixa.

A condição de contorno de fluxo específico de calor uniforme aplicado à parede do tubo é obtida pelo aquecimento proporcionado pelas resistências elétricas do tipo fita flexíveis, isoladas com poliamida modelo KH Serie 115 Volts 10 W/in<sup>2</sup>- Flexible Heaters (fornecido por OMEGA ENGINEERING, INC). Tais fitas foram fixadas sobre a superfície do tubo com o auxílio de fita adesiva de poliamida (Kapton - DUPONT<sup>R</sup>), conforme ilustra a Fig. 3.2. As resistências flexíveis enroladas sobre o tubo foram arranjadas em paralelo e conectadas à fonte de energia elétrica.

O isolamento térmico da seção de teste foi realizado com uma camada de lã de rocha de 25 mm de espessura (Fig.3.3). Para evitar a fuga de calor por condução axial, o tubo foi suportado em casquilhos de nylon tecnyl (Fig. 3.2) e a seguir todo o conjunto foi recoberto com uma manta isolante de espuma elastomérica de borracha sintética com espessura de 20 mm.

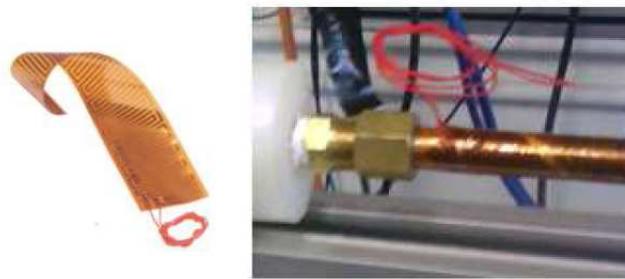


Figura 3.2 – Fotografia da resistência elétrica de fita flexível aderida à parede do tubo.



Figura 3.3 – Isolamento da seção de teste.

A proposta de construção do equipamento experimental buscou contemplar a versatilidade, de modo que o sistema é modulado e o conjunto descrito acima, denominado seção de teste, ST, pode ser removido, caso haja a necessidade de avaliar outras configurações geométricas e outros materiais para o tubo da seção de teste.

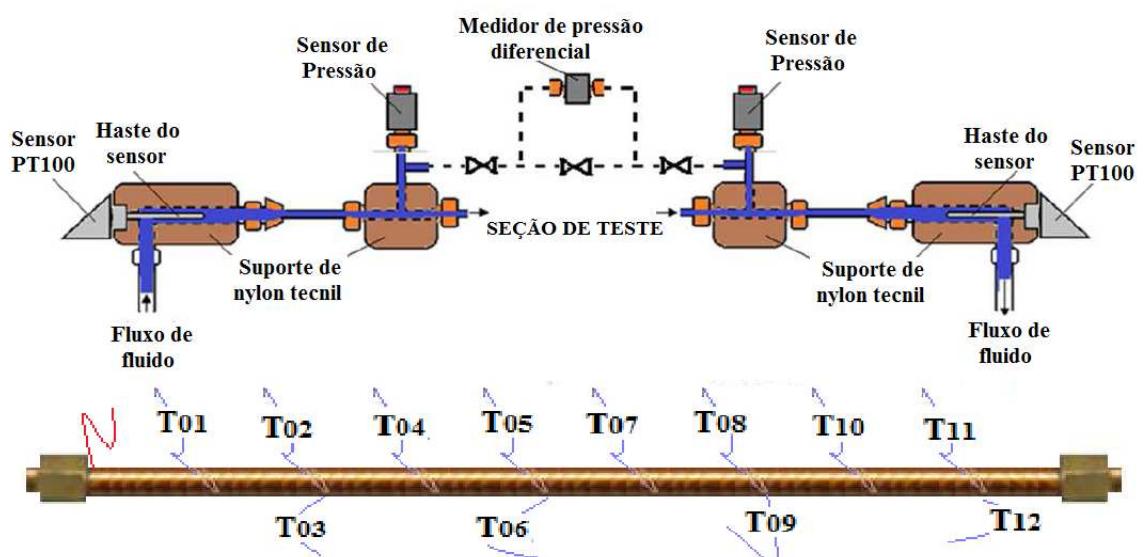


Figura 3.4 – Diagrama esquemático da seção de teste.

A seção de teste, apresentada esquematicamente na Figura 3.4, foi idealizada para permitir a avaliação experimental do comportamento termo-hidráulico de fluidos em escoamento monofásico no interior de tubo horizontal, com fluxo específico de calor uniforme na superfície.

O procedimento experimental consiste em medir a vazão mássica do fluido em escoamento, o aporte de energia elétrica sobre a superfície do tubo, a temperatura do fluido na entrada e na saída da seção de teste, a temperatura da parede do tubo em diferentes posições axiais e a diferença de pressão do escoamento de fluido entre a entrada e a saída de seção de teste.

### 3.2.2 Dispositivos de medição na seção de teste

Além do controle do aporte de energia elétrica dissipada na resistência elétrica para aquecer a parede do tubo e da vazão mássica do fluido de teste, outros parâmetros de controle e variáveis são medidos na seção de teste.

#### Temperatura do fluido na entrada e na saída da seção de teste

Esta medição é realizada por intermédio de dois sensores de temperatura (termorresistência) modelo PT100, dispositivos do tipo RTD (Resistance Temperature Detector) de três fios (fornecidos por IOPE Instrumentos de Precisão Ltda.) (Fig.3.5).

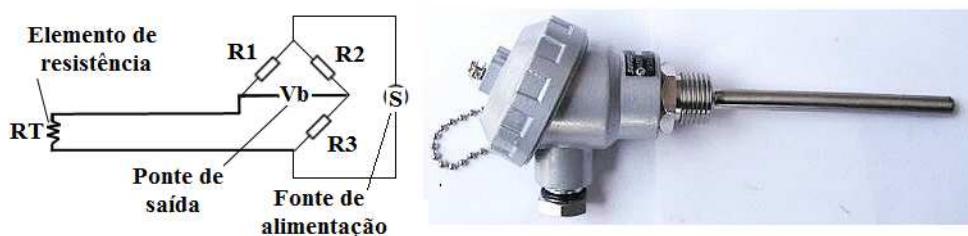


Figura 3.5 – Detalhe do sensor de temperatura modelo PT100.

O detalhe construtivo, adaptando o sensor no casquilho de nylon, logo após a curva na saída do pré-aquecedor, faz com que a bainha do sensor fique imersa numa região turbulenta e possibilite a leitura da temperatura média do fluido na entrada da seção de teste (Fig. 3.6). Estratégia idêntica é utilizada na saída da seção de teste.

#### Temperatura da parede do tubo

Foi instalado um conjunto de 12 termopares tipo T, modelo AWG-30 (Cobre-Constantan), (fornecidos por OMEGA ENGINEERING, INC). O material foi adquirido em forma de rolo de fio (Fig.3.7(a)) e as junções foram preparadas e instaladas na parede do tubo conforme anteriormente

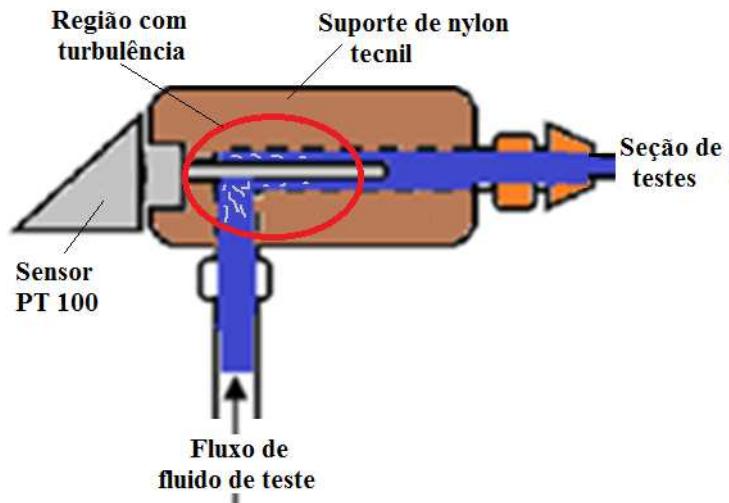


Figura 3.6 – Detalhe da instalação da termorresistência tipo PT-100 para medição da temperatura do fluido na entrada e na saída da ST.

descrito (Fig. 3.7(b)). As junções foram produzidas com descarga elétrica e, posteriormente, achatadas para que assentassem perfeitamente sobre a superfície do fundo da ranhura. Também foram adotados cuidados especiais para que o comprimento do fio dos termopares fossem idênticos e, com isso, assegurar a menor variação na leitura da temperatura da parede do tubo.

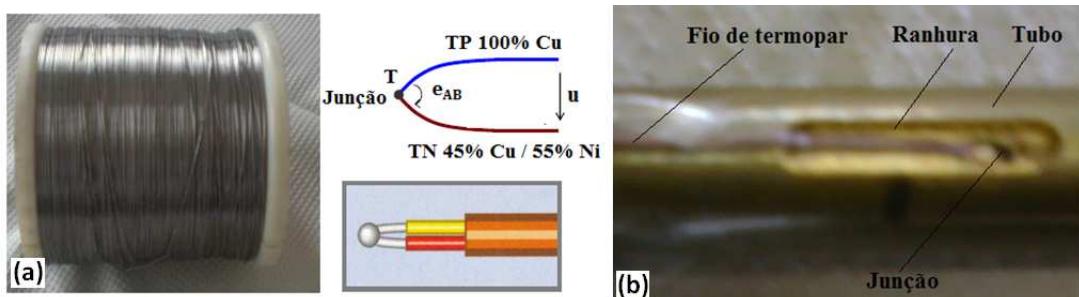


Figura 3.7 – Rolo de fios para termopares tipo AWG-30, junção (a); fixação do termopar na parede do tubo (b).

### Pressão do fluxo de fluido na entrada e na saída da ST

Foram instalados sensores de pressão, modelo PA3023, (fornecidos pela empresa IFM) na entrada e na saída da ST. Os transdutores de pressão também foram montados em casquilhos de nylon tecnil (Fig. 3.8 (a)).

### Pressão diferencial entre a entrada e a saída da seção de teste

Com o objetivo de se avaliar a queda de pressão diretamente, foi introduzido um transdutor diferencial de pressão, modelo Deltabar S PMD75 (fornecido por Endress+Hauser)

(Fig. 3.8 (b)) e uma derivação da seção de teste foi adaptada para a instalação do transmissor de pressão diferencial, conforme ilustrado pela Fig. 3.9.



Figura 3.8 – Transdutor de pressão modelo PA3023 (a); transmissor de pressão diferencial, modelo Deltabar S PMD75 (b).

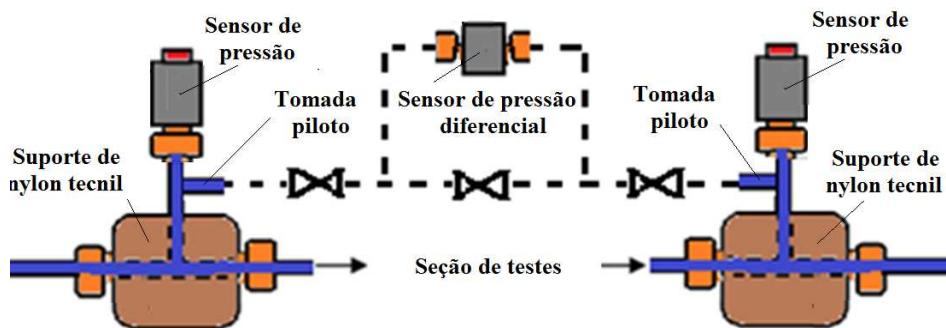


Figura 3.9 – Ilustração esquemática da instalação dos medidores de pressão e do medidor de pressão diferencial.

### 3.2.3 Circuitos termo-hidráulicos

O aparato é composto por três circuitos termo-hidráulicos, cujo esquema geral é mostrado na Figura 3.10, onde o circuito de pré-aquecimento (azul), o circuito de refrigeração (verde) e o circuito principal (vermelho) são interligados de forma que, através das suas interfaces, possibilitem atingir as condições experimentais necessárias para a realização dos testes e aquisição dos dados experimentais.

O circuito de pré-aquecimento foi totalmente desenvolvido no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, LEST, da Universidade Federal de Uberlândia. Ele consiste de um banho térmico de água, aquecido com resistência elétrica, em que a água aquecida circula num trocador de calor tipo tubos concêntricos, de fluxo paralelo, que constitui a interface com o circuito

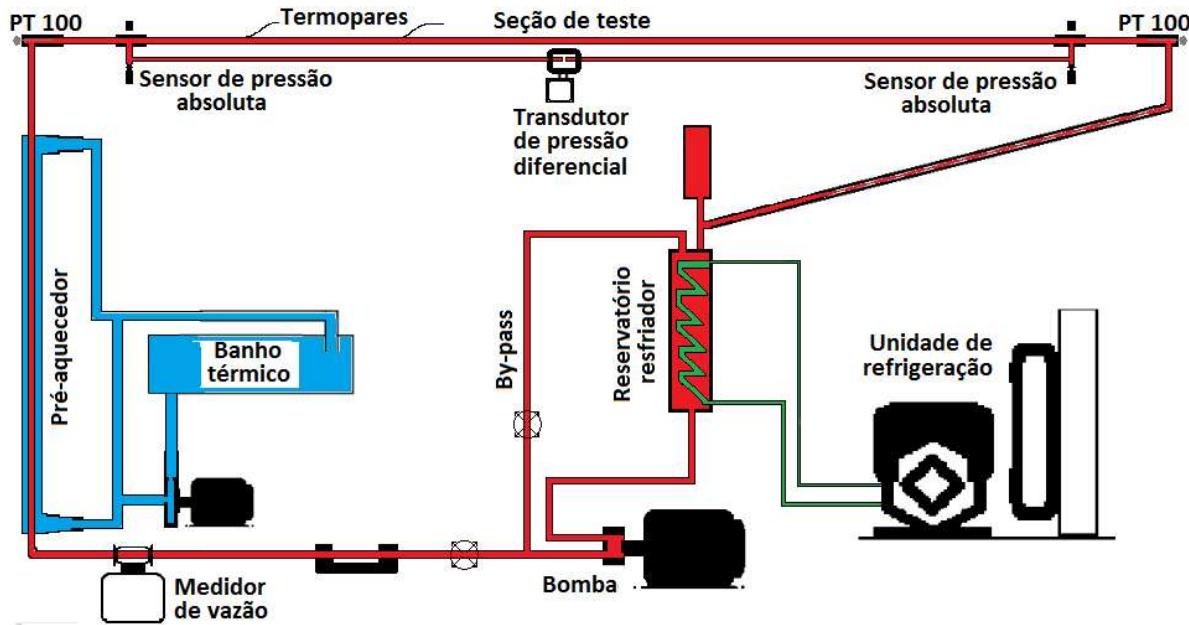


Figura 3.10 – Representação esquemática dos circuitos termo-hidráulicos.

principal. O trocador de calor tipo tubos concêntricos é o dispositivo utilizado com o objetivo de ajustar e manter constante a temperatura de entrada do nanofluido na seção de teste durante os ensaios. Em operação, o controle e o ajuste da temperatura de entrada são realizados, manipulando-se um sistema de rele controlador/atuador que liga e desliga a resistência elétrica de acordo com a temperatura estabelecida para o banho e também pelo controle do escoamento pelo trocador.

O circuito de refrigeração, cuja missão é retirar do fluido todo o calor que foi introduzido na seção de teste, é constituído de uma unidade condensadora comercial modelo LH 44/2GC 2.2, equipada com compressor modelo 2GC-2.2 Y, fornecido pela empresa BITZER S/A. A interface do circuito de refrigeração com o circuito principal ocorre em um trocador tipo casco-tubo, desenvolvido e confeccionado no LEST e que também opera como reservatório de nanofluido.

O circuito principal, por onde circula o nanofluido, por intermédio da ação de uma bomba de acoplamento magnético e de engrenagens não metálicas, é composto, além das duas interfaces anteriormente descritas, pela seção de teste, tubulação e conjunto de válvulas de bypass, uma seção de visualização, um medidor de vazão tipo coriolis, sensores de temperatura e pressão na entrada e na saída da seção de teste.

A opção por uma bomba de acoplamento magnético e de engrenagens não metálicas decorre da necessidade de evitar contato das nanopartículas e do nanofluido como um todo, com

vedações rotativas e ou com contaminantes de lubrificação.

A seguir, estes circuitos e dispositivos serão apresentados em detalhes, com uma breve descrição da contribuição de cada um deles durante a operação do equipamento experimental.

### 3.2.4 Componentes e instrumentação

Os principais componentes e instrumentos que compõem o circuito principal do equipamento experimental, foram idealizados, de maneira que o aparato como um todo, fosse capaz de atender aos propósitos necessários para a conclusão da presente pesquisa.

#### Reservatório/resfriador

Um trocador de calor casco tubo produzido no LEST, funciona também como reservatório de nanofluido e como evaporador da unidade de refrigeração. Neste ponto, o calor absorvido pelo fluido na seção de teste deve ser retirado para que o nanofluido retorne à condição de temperatura ligeiramente inferior à temperatura de entrada especificada em cada condição de teste.

O reservatório/resfriador é dotado de um suspiro e um funil para recarga, devido à necessidade de substituição do nanofluido de acordo com as baterias de ensaios experimentais (Fig. 3.11).

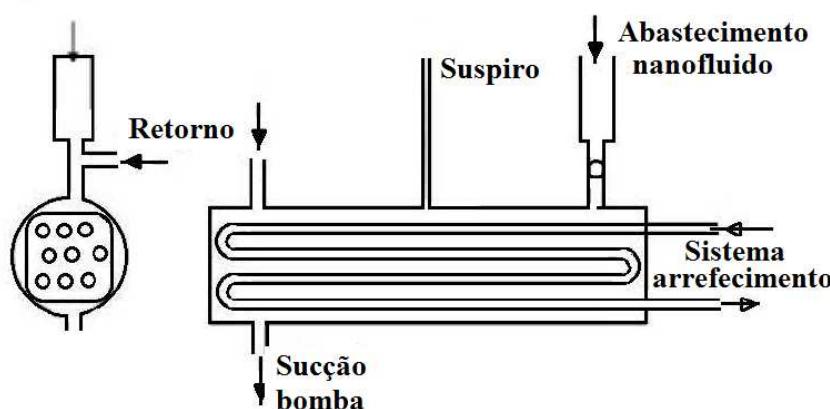


Figura 3.11 – Desenho esquemático do trocador/reservatório.

É importante ressaltar que a busca por um trocador de calor comercial com as características e dimensões necessárias para a aplicação específica não resultou satisfatória, de modo que,

optou-se pelo projeto e fabricação do dispositivo no próprio laboratório. O mesmo foi concebido de tal forma que funcionasse como reservatório de nanofluido e também como evaporador do sistema de refrigeração. É constituído de um casco de tubo de cobre com diâmetro de 63,5 mm e comprimento de 540 mm. Os tubos internos que constituem a serpentina do evaporador, também de cobre, possuem diâmetro de 9,52 mm. Nele, existe uma tomada de fluido para a bomba, uma entrada de retorno do by-pass e uma de retorno do circuito principal.

### **Bomba magnética**

Uma bomba magnética de engrenagem (ROTOGEAR MAGNETIC-DRIVE PUMPS, série 4, modelo 45 fornecida por Liquiflo Chemical Processing Pumps Ltd.), com vazão máxima de 13 LPM é mostrada na Fig. 3.12. Ela é responsável pela circulação de fluido no circuito principal e está montada em bloco com um motor elétrico de 0,5 CV (WEG), que é alimentado por um variador de frequência (modelo VLT 2800 fornecido por Danfoss do Brasil), permitindo assim a variação da vazão de nanofluido de acordo com as baterias de ensaios experimentais.

O escoamento de fluido produzido pela bomba pode ser desviado pela manipulação da válvula do circuito principal e pela válvula de by-pass para alcançar as condições necessárias aos ensaios experimentais.



Figura 3.12 – Bomba magnética de engrenagem, modelo 45- LIQUIFLO.

### **Seção de visualização**

A referida seção foi idealizada e instalada com o objetivo de visualizar o escoamento de fluido durante os ensaios. O visor é constituído de um suporte em nylon tecnyl e por um tubo de

vidro. O suporte foi usinado de modo a permitir a adaptação das conexões com a linha principal e a inserção do tubo de vidro (Fig. 3.13).

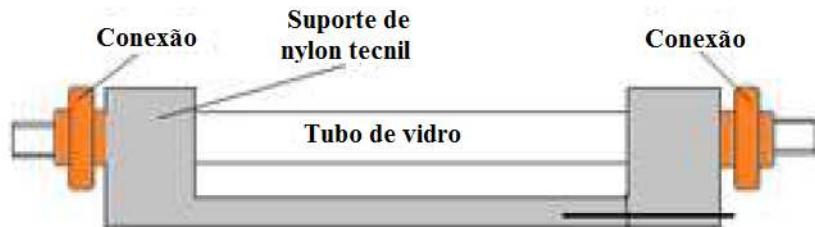


Figura 3.13 – Esboço da seção de visualização.

Devido ao fato de que todo o sistema é termicamente isolado, o visor torna-se um dispositivo importante para inspecionar o comportamento do escoamento durante a operação. O visor foi instalado no circuito principal a jusante da válvula principal e a montante do medidor de vazão, por ser uma região onde não existe problemas com a falta de isolamento.

### Medidor de Vazão Mássica

O medidor de vazão mássica do escoamento de fluido no circuito principal é formado por um conjunto sensor-conversor. O conjunto trabalha numa faixa de operação que varia de 0,0098 a 0,1686  $kg/s$ , portanto, contemplando a faixa de vazão mássica utilizada na presente pesquisa.

O sensor é do tipo coriolis, modelo RHM06-4FS1PS e a unidade eletrônica (conversor), modelo CMM01, ambos fornecidos por METROVAL Controle de Fluidos Ltda (Fig. 3.14). O sensor foi instalado na linha de escoamento principal, logo depois da seção de visualização e antes da entrada do pré-aquecedor.



Figura 3.14 – Medidor de vazão mássica (sensor RHM06 / conversor CMM01 - METROVAL).

## Pré-aquecedor

A seção de pré-aquecimento consiste de um trocador de calor tipo tubos concêntricos de corrente paralela, permitindo a variação e/ou ajuste da temperatura do nanofluido na entrada da seção de teste. No tubo interno, escoa o fluido de teste proveniente do reservatório com vazão que pode ser definida tanto pela posição de abertura da válvula de by-pass como pelo variador de frequência acoplado ao motor da bomba, conforme mencionado anteriormente. A temperatura do fluido de teste na entrada do pré-aquecedor depende do fluxo de calor imposto à parede do tubo na seção de teste e da quantidade de calor retirada do fluido no reservatório/resfriador pela ação da unidade de refrigeração.

Conforme mencionado anteriormente, este sistema, que pode ser visto na Figura 3.10, foi totalmente desenvolvido no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, LEST, da Universidade Federal de Uberlândia.

O fluxo específico de calor e a vazão mássica de fluido são parâmetros de ensaio e deles dependerá a quantidade de calor absorvida pelo fluido na seção de teste. Por sua vez, a quantidade de calor removida pela unidade de refrigeração deve ser proporcional à quantidade de calor absorvida pelo fluido na seção de teste e é ajustada durante a operação pela manipulação do controle da abertura da válvula de expansão eletrônica (VEE) e/ou pelo variador de frequência acoplado ao motor do compressor da unidade de refrigeração.

No escoamento pelo espaço anular do trocador de calor tipo tubo concêntricos circula água pela ação de uma bomba centrífuga. A temperatura da água é ajustada por um sistema constituído por um sensor de temperatura do tipo RTD de 3 fios, modelo PT100. O sinal deste sensor é enviado à um sistema de rele controlador/atuador que liga e desliga a resistência elétrica ( $5\text{ kW}$ ) quando a temperatura do banho alcançar a temperatura ajustada, que é aquela que garante a temperatura do fluido na entrada da seção de teste. No presente trabalho, a temperatura do fluido na entrada da seção de teste é um parâmetro de ensaio e, de acordo com a planilha de ensaios cobrirá as temperaturas de entrada nominais  $T_{ent_{NM}}$  de  $10$ ,  $15$  e  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.5 Sistema de aquisição e controle

A partir do processamento automático dos sinais provenientes de sensores, o sistema

de aquisição de dados é responsável pelo armazenamento dos dados para futuro tratamento.

Os principais parâmetros e variáveis do sistema desenvolvido para a avaliação experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos em escoamento monofásico podem ser assim destacados: vazão mássica do fluido em teste; as temperaturas do fluido na entrada e na saída da seção de teste; a temperatura da parede do tubo, em diferentes posições,  $x$ , a partir da entrada da seção de teste e a pressão na entrada e na saída da seção de teste.

Além dos parâmetros citados, necessários para os propósitos do presente trabalho, outros parâmetros são monitorados e controlados durante a operação do sistema. O esquema de operação do sistema foi projetado para permitir que se estabeleça, ao menos em um intervalo de tempo suficientemente grande, um regime permanente de escoamento hidráulico e termodinâmico. Estas condições são estabelecidas pela manipulação dos parâmetros operacionais que, de algum modo, assegurem as condições de regime permanente para a vazão mássica, a temperatura do fluido na entrada da seção de teste e o fluxo de calor pela parede do tubo da seção de teste.

Simultaneamente, o sistema de aquisição de dados será capaz de armazenar as leituras referentes aos parâmetros de teste juntamente com as respostas variáveis, isto é, a temperatura da parede do tubo em diferentes posições na direção axial do fluxo, a temperatura do fluido na saída da seção de teste e a diferença de pressão do escoamento entre a entrada e a saída da seção de teste.

Em cada teste, o registro do aporte de energia fornecido ao conjunto de resistências elétricas que aquecem a parede do tubo deve ser realizado. As medições da corrente e da tensão são realizadas por intermédio de multímetros digitais (modelo Mesco DM-890 e Yokogawa TY-530, respectivamente).

## Placa de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um computador com software de programação LabView (ambiente gráfico para programação LabView da National Instruments) e uma placa de aquisição de dados NI cDAQ-9172 (Fig. 3.15) que operam conectados aos sensores descritos anteriormente, processando os sinais por eles enviados e que correspondem as grandezas físicas medidas. A placa de aquisição captura os sinais dos sensores que são visualizados numa

interface gráfica do programa LabView. Os dados são processados e armazenados numa tabela de texto em formato ".txt." para posterior análise. O sistema tem capacidade de leitura de 10 dados por segundo, calculando a média dessas leituras e armazenando 1 dado por segundo. Assim, obtém-se 60 linhas de dados a cada minuto.



Figura 3.15 – Placa de aquisição cDAQ e módulos da National Instruments.

### Variadores de frequência

O controle da velocidade de rotação do motor do compressor da unidade de refrigeração e do motor da bomba magnética de engrenagens é realizado por variadores de frequência VLT série 2800 (Fig. 3.16), com a finalidade de se atingir um ajuste mais fino nas diferentes condições de operação da bancada experimental.



Figura 3.16 – Variadores de frequência VLT, série 2800.

### Sistema de operação

O monitoramento das condições de operação da bancada experimental é realizado por intermédio de uma interface gráfica em ambiente LabView. O sistema possibilita o monitoramento

e processamento dos dados adquiridos pela placa de aquisição direcionando-os para o local de armazenamento.

A interface é constituída de duas telas principais, uma com janelas para apresentação gráfica do comportamento das variáveis de interesse durante a operação (Fig. 3.17) e outra desenvolvida para o monitoramento da seção de teste (Fig. 3.18).

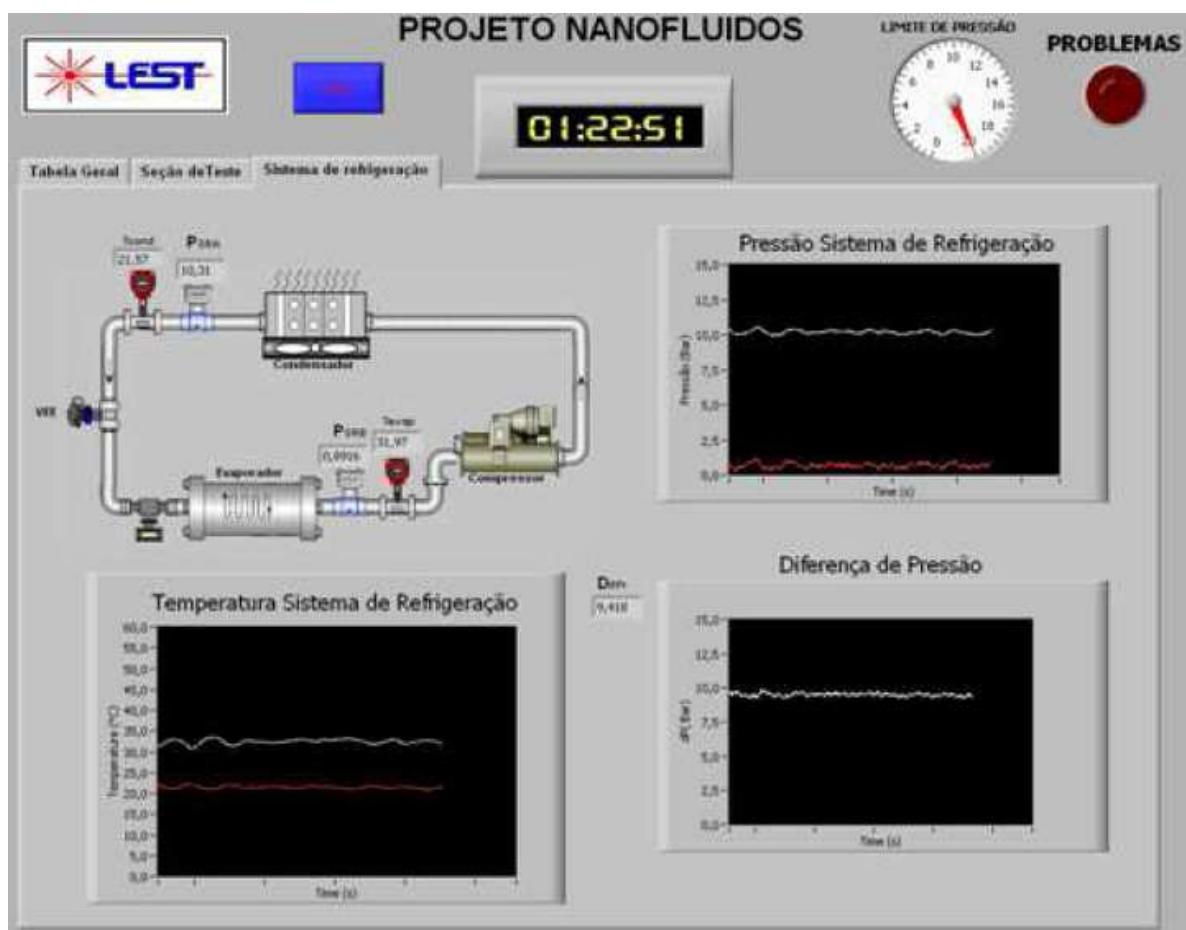


Figura 3.17 – Tela principal da interface gráfica em LabView / sistema refrigeração.

O funcionamento da bancada, após reguladas a vazão mássica e o fluxo específico de calor, inicia-se com a operação do sistema de pré-aquecimento. Definida a temperatura do fluido na entrada da seção de teste, a temperatura do banho térmico do pré-aquecedor é ajustada, juntamente com a regulagem do fluxo através da região anular do trocador de tubos paralelos do pré-aquecedor, garantindo a temperatura desejada para o na entrada do na seção de teste.

O sistema de refrigeração, por sua vez, deve ser operado para que todo o calor adquirido pelo fluido na seção de teste seja retirado enquanto o fluido de teste circula pelo reservatório resfriador. Os principais parâmetros do sistema de refrigeração (pressões, temperaturas e a

frequência de operação do compressor) são monitorados e controlados de modo que o operador, em caso de desequilíbrio, atue alterando a abertura da VVE ou alterando a rotação do motor do compressor por intermédio da regulagem do variador de frequencia. A manipulação do sistema visa a alcançar, em algum instante, um estado de regime permanente, momento em que os dados experimentais são armazenados.

A tela de monitoramento da seção de teste apresenta o esquema da seção de teste, os sensores de pressão e temperatura com displays que exibem a leitura dos dados, além de janelas onde são mostrados os gráficos do comportamento das variáveis monitoradas (Fig. 3.18). Esta tela exibe também a vazão mássica de fluido, a diferença entre as temperaturas do fluido na entrada e na saída da seção de teste e a diferença entre a pressão na entrada e na saída da seção de teste.

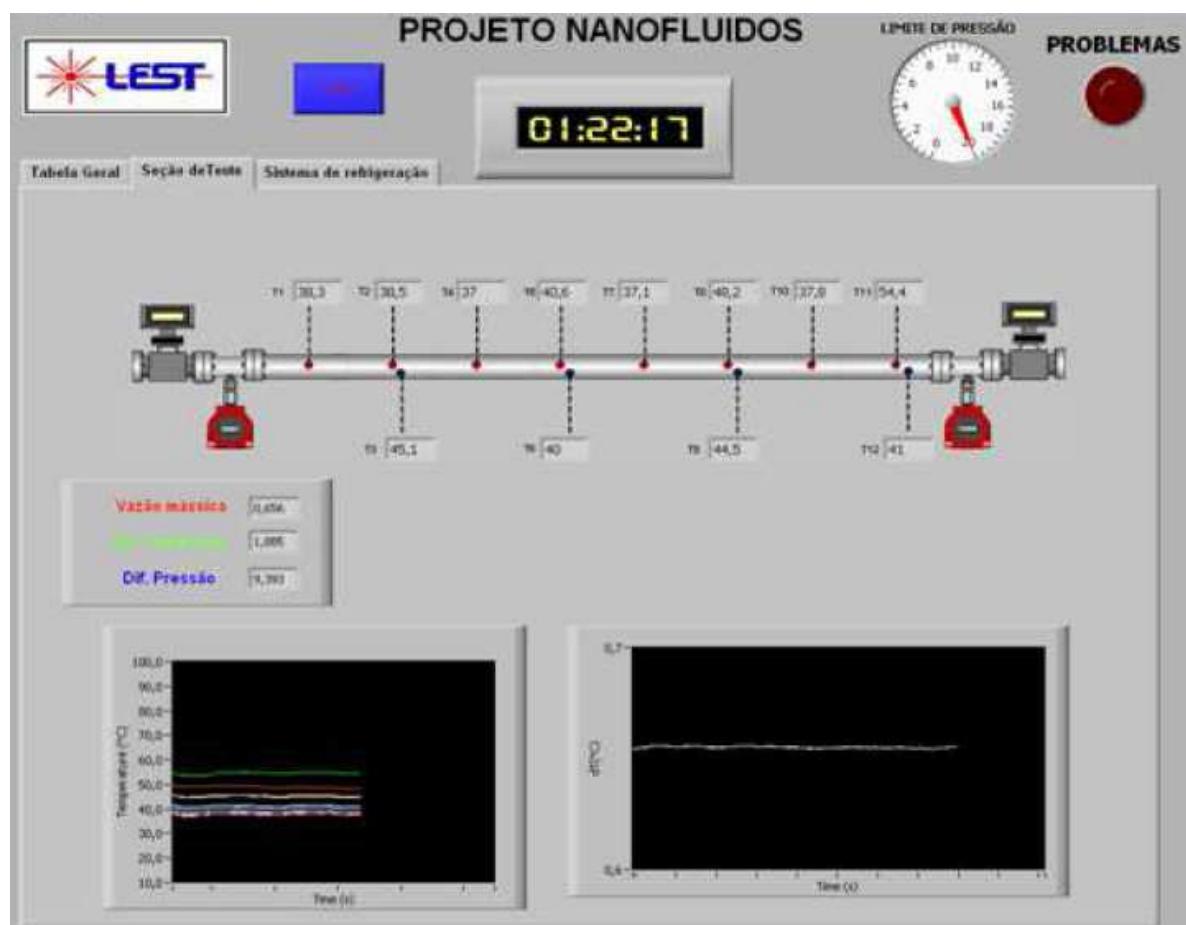


Figura 3.18 – Tela principal da interface gráfica em LabView / seção de teste.

Nessas condições, o equipamento experimental na sua forma final é mostrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Foto do aparato experimental.

Os ensaios iniciais para avaliar as condições de operação foram realizados e os resultados quanto a qualidade do isolamento da seção de teste por intermédio do balanço de energia e da perda de carga do escoamento serão mostrados na seção seguinte.

### 3.3 Avaliação do Equipamento Experimental

Durante a construção da bancada, sempre que um dispositivo ou componente foi agregado ao sistema, sua aptidão em atender as funções desejadas foi avaliada. Uma vez instalados todos os componentes do circuito principal, dos circuitos auxiliares, o sistema de operação e o sistema de aquisição de dados, procederam-se os ensaios preliminares a fim de verificar a funcionalidade da bancada, bem como as respostas do sistema. Nesta seção serão descritos os procedimentos de avaliação do aparato como um todo.

#### 3.3.1 *Ensaios preliminares*

O primeiro teste de funcionamento geral da bancada foi realizado utilizando um volume

de 2100  $ml$  de água destilada. Embora sempre se tenha buscado minimizar o volume interno de fluido necessário para os testes, esse volume aumentou dos 1500  $ml$  do projeto inicial para 2100  $ml$ .

O teste envolveu a variação de todos os parâmetros com vistas a se determinar a faixa de operação de cada um deles, estabelecendo a rotina de operação necessária para alcançar as condições de operação específicas de cada ensaio, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Testes preliminares

Fluido	$T_{ent_{NM}}$ [°C]	$Q_{for_{NM}}$ [W]	$\dot{m}_{NM}$ [g/s]
Água destilada	10	300	20
		500	30
		700	40
	15	500	50
		700	60
		900	70
	20	500	80
		700	90
		900	100

Outros objetivos deste ensaio preliminar foram:

- Verificar a ausência de vazamentos;
- Testar a rotina de aplicação e retirada do fluido de teste;
- Avaliar o perfeito funcionamento da válvula principal e do by-pass;
- Verificar o funcionamento da bomba e as respostas do sistema de pré-aquecimento;
- Verificar o funcionamento e as respostas do sistema de arrefecimento do fluido de teste;
- Verificar o funcionamento da resistência elétrica responsável pelo fluxo de calor pela parede do tubo da seção de teste;
- Verificar os sistemas de controle e de aquisição de dados;

Estando todos os dispositivos operando normalmente e os resultados, aparentemente, dentro das expectativas e apresentando as tendências esperadas, procedeu-se a uma bateria de ensaios definida em função da faixa de vazão e fluxo de calor, que permitissem obter uma apreciável diferença entre a temperatura do fluido na entrada e na saída da seção de teste. O

objetivo foi determinar, com maior precisão, a faixa de operação da bancada para os parâmetros: vazão mássica, temperatura do fluido na entrada da seção de teste e fluxo de calor.

O controle desses parâmetros é conduzido pela manipulação dos dispositivos de operação. A vazão mássica,  $\dot{m}$ , e a quantidade de calor,  $Q_{for}$ , são valores fixos em cada ensaio, e são ajustados antecipadamente. No caso da vazão mássica,  $\dot{m}$ , o ajuste é realizado por intermédio da manipulação da válvula de by-pass, seguido de um ajuste fino do variador de frequência do motor da bomba. O ajuste da potência fornecida (fluxo de calor),  $Q_{for}$  é realizado por intermédio da regulagem da tensão de saída do VARIVOLT (também são monitorados os valores de tensão,  $V$ , e da corrente,  $i$ , na saída da fonte de alimentação das resistências elétricas flexíveis adaptadas ao redor do tubo da ST).

O ajuste da temperatura do fluido na entrada da seção de teste,  $T_{ent}$ , é realizado com o sistema funcionando e depende da vazão mássica do fluido de teste e da quantidade de calor adicionado ao sistema por intermédio das resistências elétricas. A temperatura de entrada do fluido na ST é garantida pela manipulação das condições de operação do pré-aquecedor. Assim, a temperatura do banho térmico do pré-aquecedor vai depender da temperatura do fluido de teste e esta é função da quantidade de calor que é retirada do sistema no reservatório/resfriador pela ação da unidade de refrigeração. A quantidade de calor removida do sistema é ajustada pela manipulação do controle de abertura da VEE (válvula de expansão eletrônica) e do variador de frequência do motor do compressor do sistema de refrigeração. Este processo, como mencionado anteriormente, é dinâmico e exige sucessivos ajustes para fazer o sistema convergir à condição de equilíbrio entre a quantidade de calor absorvida e cedida pelo fluido de teste, atingindo, assim, o regime permanente.

A condição nominal de temperatura de entrada, conforme especificada na planilha de ensaios,  $T_{ent_{NM}}$ , ao permanecer constante por um intervalo de tempo suficiente, atinge o estado de regime permanente. Enquanto o sistema está em operação é possível visualizar o valor da temperatura do fluido na entrada da ST, através de sinal do sensor de temperatura PT-100, instalado na corrente de líquido na entrada da mesma. O sinal aparece, tanto numericamente na janela do sistema de aquisição em LabView, como na forma de um gráfico. Simultaneamente, acima e, abaixo do display, estão colocados sinais luminosos que indicam que a  $T_{ent}$  está dentro da faixa especificada para a temperatura de entrada nominal com uma variação de  $\pm 0,5^{\circ}C$  de

modo que o operador manipule as condições de operação do pré-aquecedor para ajustar qualquer parâmetro que faça com que o sistema atinja uma condição de estabilidade. Assim, uma vez que o sistema esteja em equilíbrio, são realizados ajustes cada vez mais finos até que quaisquer variações nos sinais enviados pelos sensores de vazão,  $\dot{m}$ , de temperatura de entrada,  $T_{ent}$ , e de potência fornecida,  $Q_{for}$ , permaneçam sem alterações significativas para, a partir desse instante, iniciar-se a aquisição dos dados experimentais do referido ensaio.

### 3.3.2 Verificação dos resultados

O bom funcionamento do equipamento experimental durante a realização dos ensaios térmicos foram avaliados pela verificação da consistência dos resultados das medições experimentais através do balanço de energia (avaliar fuga de calor pelo isolamento térmico) e do cálculo do coeficiente de transferência de calor a partir dos dados experimentais e comparando-o com aquele dado pela correlação de Gnielinski (1976). Da mesma forma, como os testes térmicos e hidráulicos foram realizados simultaneamente, a avaliação da consistência das medidas da perda de carga foi realizada comparando-as com os resultados decorrentes do cálculo da perda de carga através da Eq. (3.1), onde o fator de atrito,  $f$ , resulta da correlação de Pethukov (1970) (Eq.(3.2)).

$$\Delta P = f \frac{8(\dot{m})^2}{\pi^2 \rho D^5} L, \quad (3.1)$$

onde

$$f_P = (0,790 \ln(Re_D) - 1,64)^{-2}, \quad (3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6). \quad (3.2)$$

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a água e para as misturas de Propileno-glicol/água e Tyfoxit/água. Os resultados experimentais também foram incluídos no mesmo gráfico, com o objetivo de permitir a comparação visual do comportamento dos diferentes fluidos operando sob as mesmas condições nominais de temperatura de entrada, fluxo de calor pela parede do tubo da ST e mesma vazão mássica.

Definidos os parâmetros nominais para temperatura de entrada,  $T_{entNM}$ , vazão mássica de fluido,  $\dot{m}_{NM}$ , a potência elétrica fornecida às resistência  $Q_{forNM}$  a planilha de ensaios planejada foi executada utilizando água destilada como fluido de ensaio.

O tubo utilizado na ST para esses ensaios apresentava as seguintes características geométricas:

- Comprimento do tubo:  $L_{ST} = 2,48\text{ m}$ ;
- Diâmetro externo:  $D_e = 12,7\text{ mm}$ ;
- Diâmetro interno:  $D_i = 6,35\text{ mm}$ ;
- Espessura da parede:  $e_p = 3,175\text{ mm}$ ;
- Área da seção transversal interna:  $A_{sr} = 31,7\text{ mm}^2$ ;
- Perímetro:  $P_{er} = 19,9\text{ mm}$ ;
- Área da superfície (entrada de calor):  $A_{ST} = 49474\text{ mm}^2$ .

Entre cada campanha de ensaio, ou seja, para cada troca de fluido de teste foram realizados ensaios experimentais com água destilada para verificar a consistência dos resultados e o bom funcionamento do equipamento experimental. Assim, após a drenagem e limpeza, a bancada era carregada com água destilada e réplicas dos testes com o mesmo fluido eram realizadas, para efeitos de repetibilidade.

### **Isolamento térmico - balanço de energia**

O cálculo das perdas de calor para o ambiente foi realizada relacionando a potência elétrica aplicada na ST,  $Q_{for}$ , com aquela resultante do cálculo do balanço de energia,  $Q_{exp}$ , a partir dos dados experimentais, através da Eq.(3.3).

$$Q_{exp} = \dot{m} c_P \left( T_{m(s)} - T_{m(e)} \right). \quad (3.3)$$

A Figura 3.20 apresenta os resultados experimentais obtidos para os testes com água destilada. Pode-se observar que o desvio médio da potência elétrica aplicada na seção de teste em relação àquela obtida do balanço de energia, foi de 3,2% para potências variando entre 500 e 900 W e vazão mássica variando entre 20 e 100 g/s.

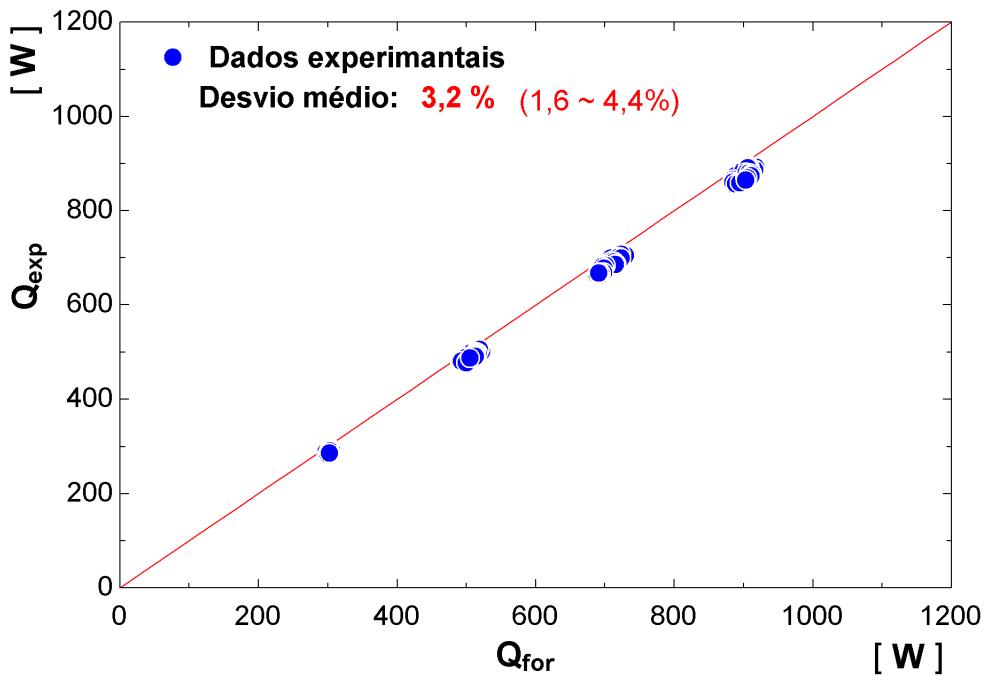


Figura 3.20 – Resultados experimentais relacionando a potência elétrica,  $Q_{for}$ , aplicada na seção de teste com a potência calculada pelo balanço de energia,  $Q_{exp}$ , para testes com água destilada.

### Medição de temperatura - coeficiente de transferência de calor

A avaliação da resposta do equipamento experimental, em relação a medição da temperatura da parede do tubo da ST, temperatura do fluido na entrada e na saída da ST e da taxa de fluxo de calor pela parede do tubo da ST que permitem determinar, experimentalmente, o coeficiente de transferência de calor conforme a definição a seguir,

$$h_{(x)} = \frac{\dot{q}}{T_{p_{(x)}} - T_{f_{(x)}}}, \quad (3.4)$$

foi realizada por intermédio da comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente e aquele calculado pela correlação de Gnielinski (Eq. (3.5)).

$$\bar{h} = \frac{k}{D} \left[ \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left( \frac{f}{8} \right)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)} \right]. \quad (3.5)$$

Os resultados apresentados na Figura 3.21 revelam que as medidas, principalmente de temperatura, se mostraram bastante confiáveis.

É interessante observar que o desvio médio proporcionado pelos resultados experi-

mentais em relação àqueles obtidos pela correlação de Gnielinski foi de 5,7%. Vale ressaltar que os resultados foram levantados para uma faixa de velocidade mássica variando entre 600 e  $3200 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ , correspondendo a Reynolds entre 3000 e 24000.

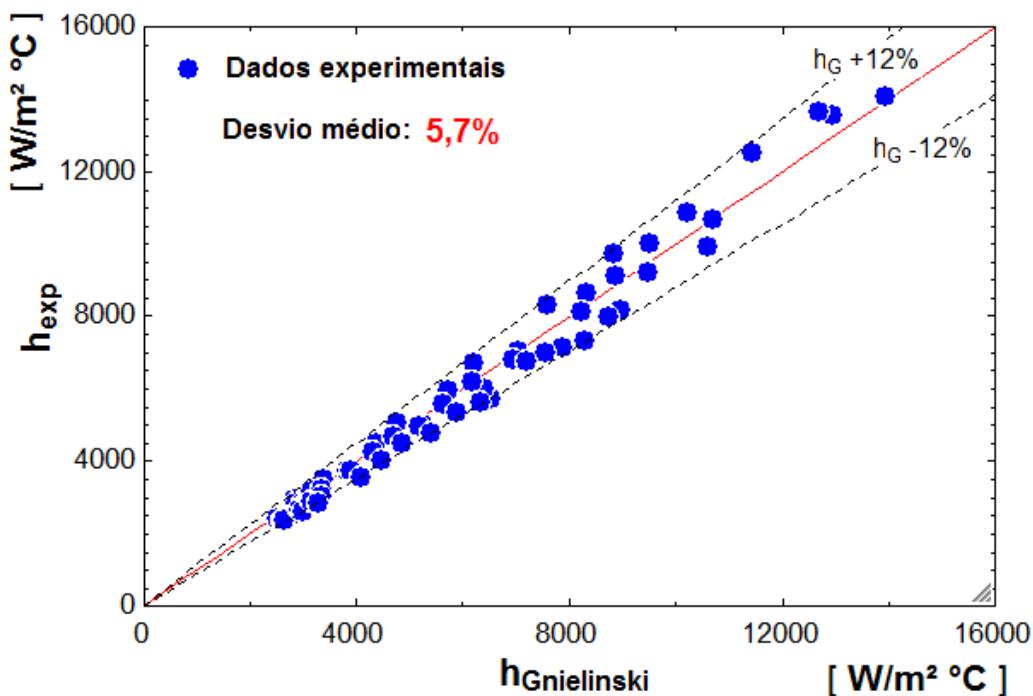


Figura 3.21 – Comparação entre o coeficiente de transferência de calor avaliado experimentalmente e aquele calculado pela correlação de Gnielinski para testes com água destilada.

### Medidores de pressão - perda de carga

A Figura 3.22 ilustra os resultados da queda de pressão por unidade de comprimento,  $\Delta P_{\text{exp}}/L$ , para o escoamento de água destilada através do tubo da ST em distintas velocidades mássicas,  $G$ , sendo que a velocidade mássica é dada por:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{sr}}. \quad (3.6)$$

O tubo da ST, conforme mencionado anteriormente, é um tubo de latão com diâmetro interno e comprimento total de  $6,35 \text{ mm}$  e  $2480 \text{ mm}$ , respectivamente. A perda de carga foi avaliada utilizando um sistema redundante, isto é, foram instalados dois sensores de pressão, um na entrada e outro na saída da ST e mais um transdutor diferencial de pressão com precisão de

leitura de 0,25 % do fundo de escala, para medir a diferença de pressão no escoamento do fluido entre a entrada e a saída da ST.

É importante ressaltar que os dados referentes ao comportamento hidrodinâmico foram adquiridos simultaneamente com os testes térmicos. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados de correlações empíricas para a perda de carga calculada pela Eq. (3.1), onde o fator de atrito,  $f$ , é dado pela Eq.(3.2) e as propriedades da água referem-se àquelas calculadas na temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da ST.

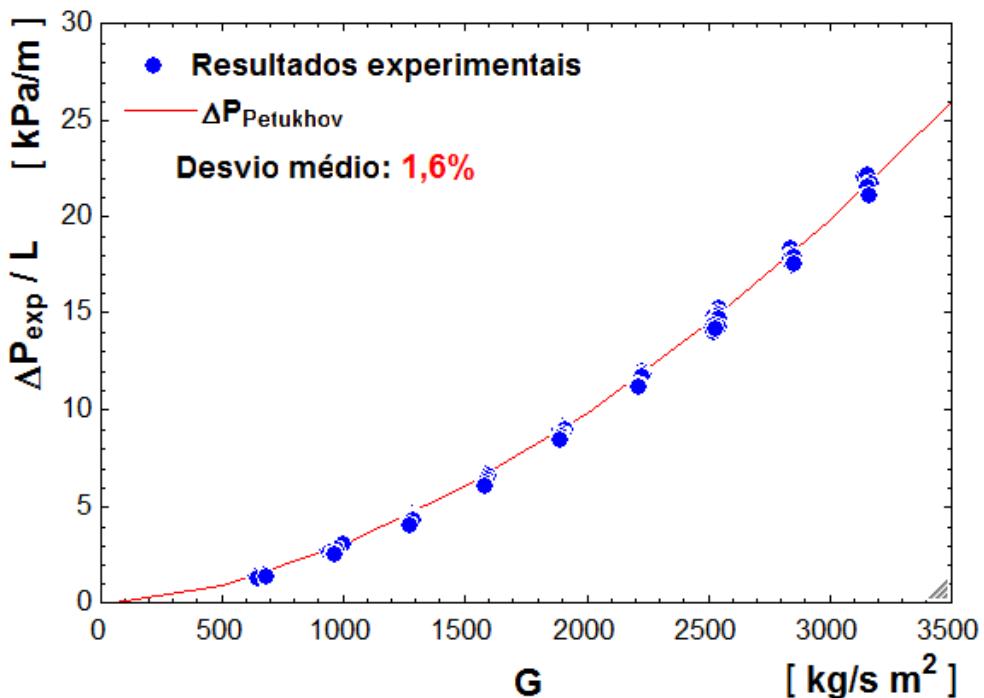


Figura 3.22 – Resultados obtidos para  $\Delta P_{exp} / L$  com água destilada escoando no interior do tubo da ST para diferentes velocidades mássicas,  $G$ .

Como pode ser observado pelos dados apresentados na Figura 3.22, os resultados experimentais para a perda de carga apresentam boa concordância com os valores calculados a partir da correlação teórica, e apresentam um desvio médio em relação à correlação menor que 2 %.

A medição experimental da perda de carga do escoamento do fluido na ST permite, por intermédio da Eq. (3.1), determinar o fator de atrito experimental  $f_e$ . A Figura 3.23 ilustra os resultados experimentais para o fator de atrito,  $f_e$ , determinado a partir da medida da perda de carga por unidade de comprimento em comparação com o fator de atrito calculado a partir da correlação de Petukhov (Eq. (3.2)) em função do número de Reynolds, mostrando que os resultados experimentais apresentam desvio de 1,6 % em relação à correlação.

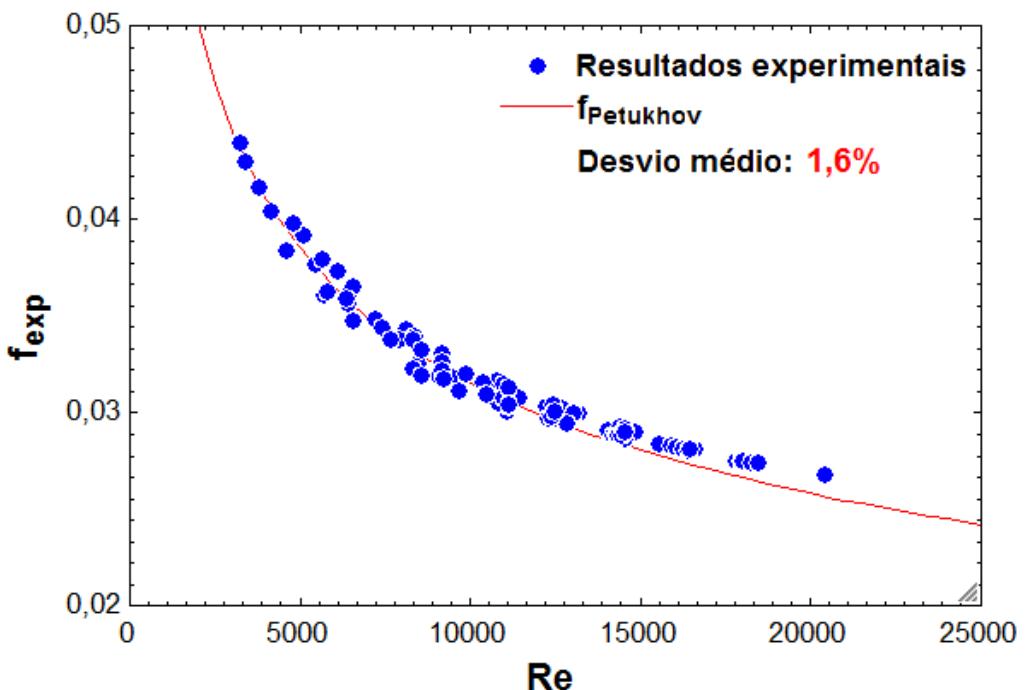


Figura 3.23 – Resultados obtidos para  $f_e \times Re$  com água destilada escoando no interior do tubo da ST.

### 3.3.3 Comparação dos resultados

Para os propósitos desse trabalho, isto é, a avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono à base de água, a estratégia consiste em comparar os resultados adquiridos a partir das campanhas de ensaio dos nanofluidos com os resultados medidos para o fluido base (água) nas mesmas condições. Desse modo, apresenta-se a seguir uma comparação entre os resultados dos testes realizados com as misturas de Propileno-glicol/água e TyFoxit/água com os resultados obtidos para a água.

#### Perda de carga

A perda de carga é fator relevante para a escolha do fluido de trabalho a ser aplicado no sistema de transferência de calor. Assim, não se pretende com isso classificar este ou aquele fluido como melhor, pois cada aplicação exige critérios diferentes para esta finalidade.

As Figuras 3.24 e 3.25 ilustram a comparação dos resultados experimentais para a perda de carga dos três fluidos convencionais testados durante as campanhas de ensaios preliminares realizados para a validação do equipamento experimental.

Especificamente, estes são os resultados realizados nas condições nominais de temperatura de entrada,  $10^{\circ}C$ , fluxo de calor aplicado à parede do tubo da seção de teste,  $10\text{ kW/m}^2$  e com vazões mássicas variando na faixa de 20 a  $100\text{ g/s}$ .

A Figura 3.24 ilustra os resultados da perda de carga por unidade de comprimento do escoamento dos diferentes fluidos na ST em função do número de Reynolds,  $Re$ , calculado a partir da vazão mássica, do diâmetro do tubo da ST e das propriedades termofísicas do fluido, de acordo com a equação,

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}. \quad (3.7)$$

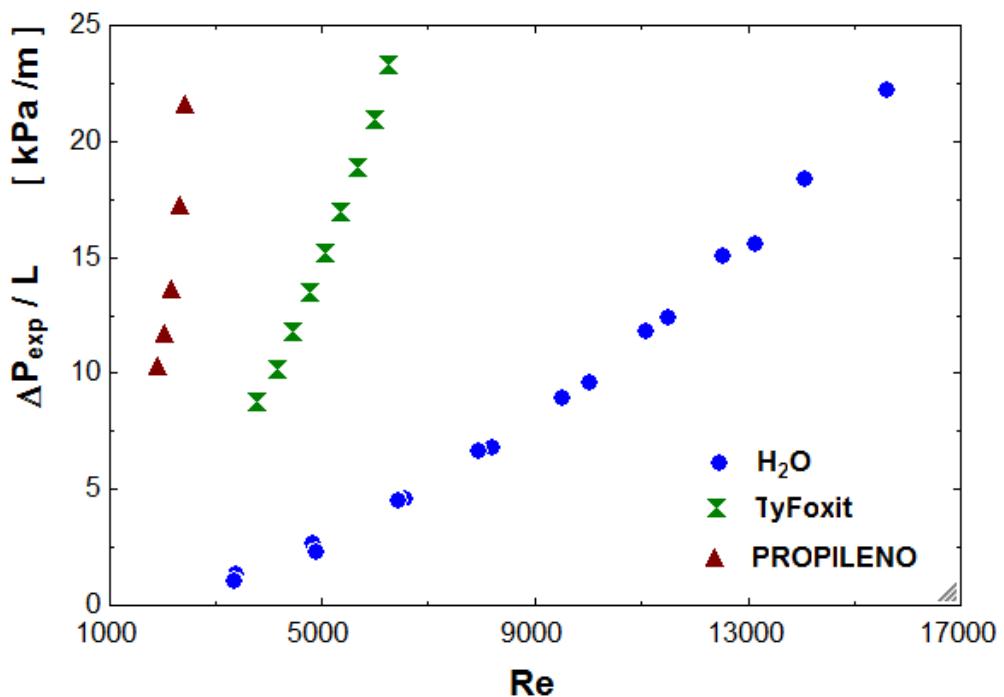


Figura 3.24 – Resultados de  $\Delta P_{exp}/L \times Re$  das misturas propileno-glicol/água, TyFoxit/água e água destilada, escoando segundo diferentes  $\dot{m}$ , e nas condições térmicas de  $10^{\circ}C$  e  $10\text{ kW/m}^2$ .

A Figura 3.25 ilustra os resultados da perda de carga por unidade de comprimento do escoamento dos diferentes fluidos na ST em função da velocidade mássica,  $G$ .

O critério de comparação em função da velocidade mássica,  $G$ , decorre do fato de que, para o cálculo do número de Reynolds,  $Re$ , é necessário o conhecimento das propriedades termo-físicas do fluido de teste. No entanto, a velocidade mássica,  $G$ , depende somente da vazão mássica,  $\dot{m}$ , que é um dos parâmetros de teste.

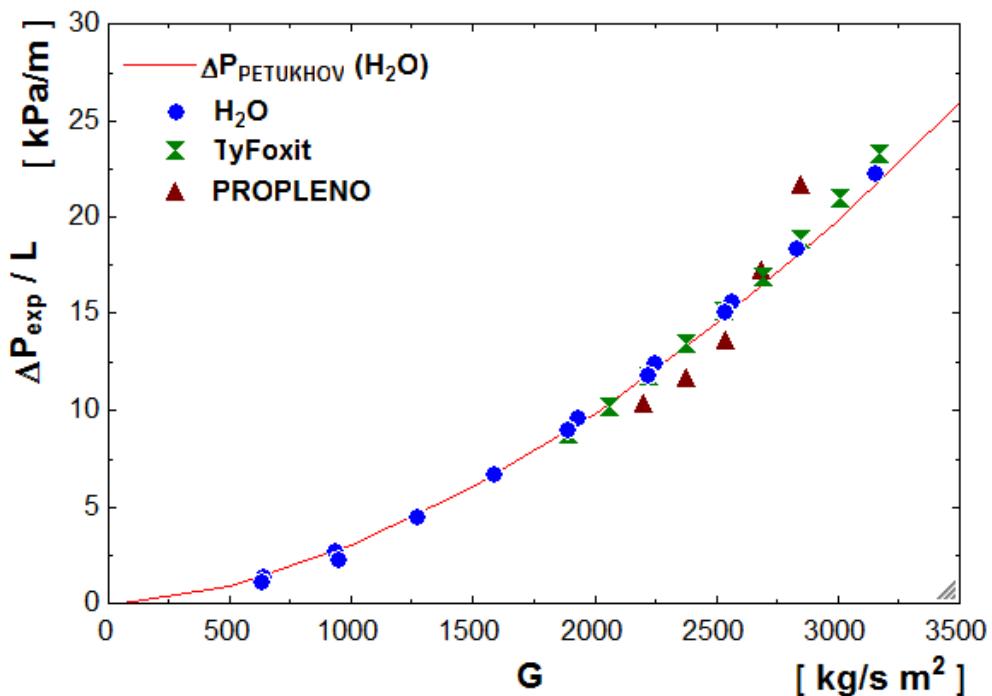


Figura 3.25 – Resultados de  $\Delta P_{exp}/L \times G$  para misturas propileno-glicol/água, TyFoxit/água e água destilada, escoando segundo diferentes,  $\dot{m}$ , e nas condições térmicas de  $10^{\circ}C$  e  $10\text{ kW/m}^2$ .

É importante destacar que as Figs. 3.24 e 3.25 evidenciam a necessidade de rigoroso discernimento quanto ao critério a ser utilizado na comparação de resultados experimentais. Neste caso, por exemplo, é evidente o efeito das propriedades termofísicas dos fluidos envolvidos quando a comparação é feita em termos do mesmo número de Reynolds.

Nas Figuras 3.26 e 3.27, a seguir, são apresentados os resultados experimentais levantados para as misturas de Propileno-glicol/água destilada, TyFoxit/água destilada juntamente com os resultados experimentais levantados para a água destilada.

Os resultados de  $\Delta P_{exp}/L$  para os diferentes fluidos de teste e segundo as diferentes condições de ensaio são comparados em função do número de Reynolds,  $Re$ , e em função da velocidade mássica,  $G$ .

O cálculo do número de Reynolds dos fluidos de teste, foi realizado a partir das propriedades termofísicas, segundo a Eq. (3.7). A temperaratura de referência para a determinação das propriedades termofísicas do fluido de teste é tomada como sendo a temperatura média entre a temperatura de entrada e de saída do fluido na ST. Assim, observa-se nas Figs. 3.26 e 3.27, o efeito da temperatura de entrada  $T_{ent}$  sobre o número de Reynolds.

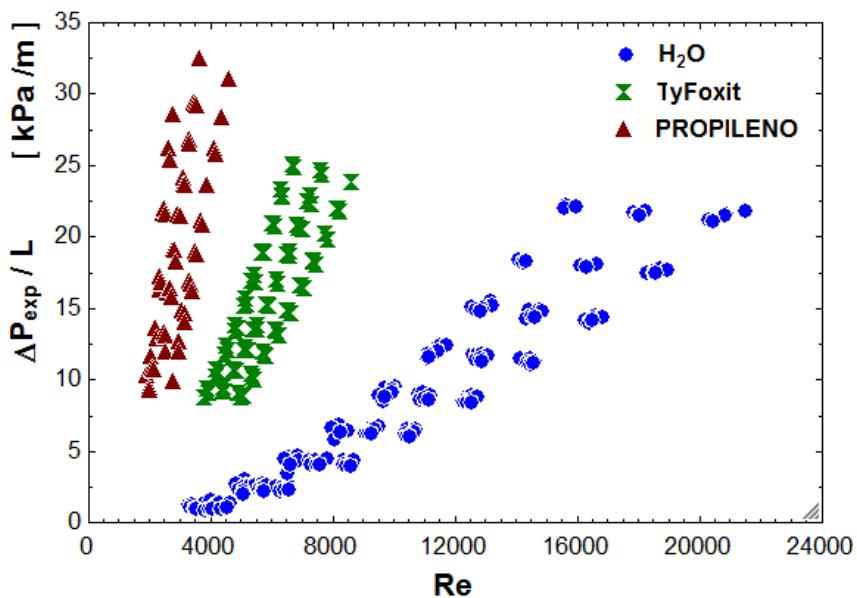


Figura 3.26 – Comparação dos resultados obtidos para  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ .

A Figura 3.27 ilustra os mesmos resultados mostrados na Fig. 3.26, porém, aqui a perda de carga por unidade de comprimento dos diferentes fluidos é comparada em função da velocidade mássica,  $G$ , isto é, o gráfico mostra  $\Delta P_{exp}/L \times G$ .

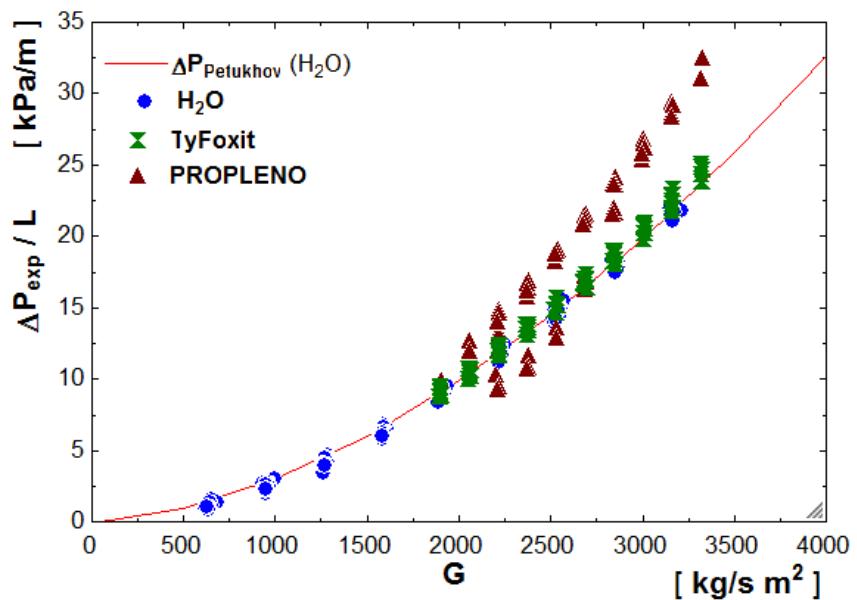


Figura 3.27 – Comparação dos resultados obtidos para  $\Delta P_{exp}/L \times G$ .

Como pode ser observado, os resultados levantados nos testes preliminares, realizados com diferentes fluidos, indicam que o equipamento experimental responde, satisfatoriamente, às variações dos parâmetros de ensaio a serem adotados na análise experimental da perda de carga das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O.

## Transferência de calor

Nas campanhas de ensaios, os testes hidráulicos e térmicos sempre foram realizados simultaneamente. Conforme colocado anteriormente, o procedimento experimental exige que se atinja o regime permanente, por um período de tempo suficientemente grande, de modo a que se proceda à aquisição de dados, que atendam as hipóteses simplificadoras dos modelos, isto é, devem ser atingidos os regimes permanentes de escoamento do fluido e de fluxo constante e uniforme de calor pela parede do tubo da ST.

Assim, as figuras a seguir (Figs. 3.28 e 3.29) ilustram os resultados para o coeficiente de transferência de calor das misturas Propileno-glicol/água, TyFoxit/água e da água. Os resultados para os três fluidos foram introduzidos no mesmo gráfico para efeito de comparação do comportamento de cada tipo de fluido.

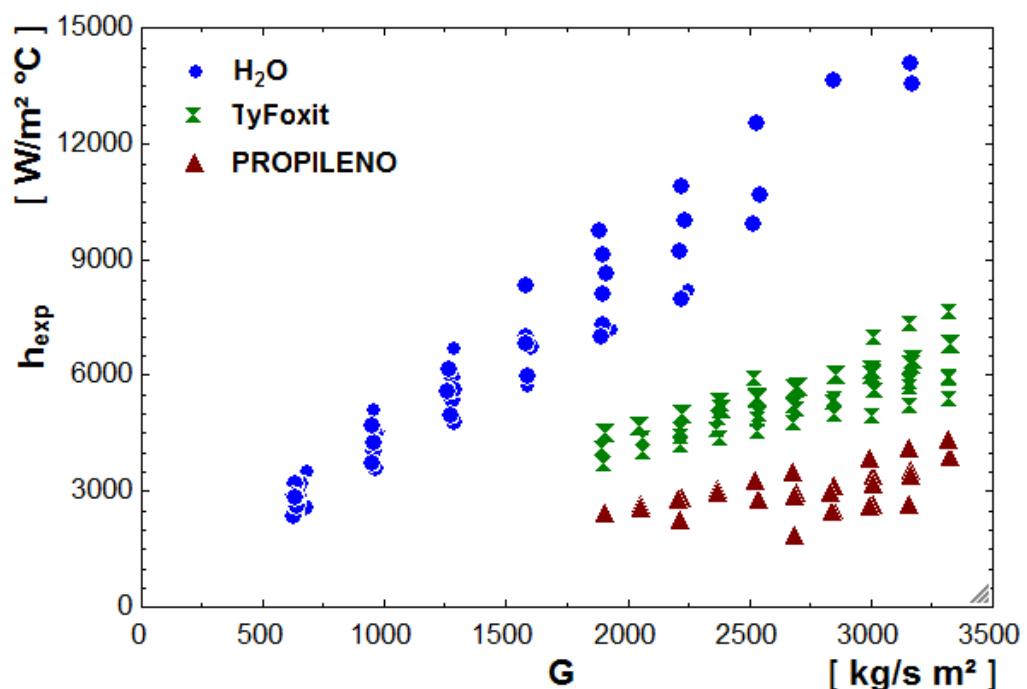


Figura 3.28 – Comparaçāo dos resultados experimentais para  $h_{exp} \times G$ .

A Figura 3.28 ilustra o coeficiente de transferência de calor em função da velocidade mássica, ( $h_{exp} \times G$ ), sendo possível observar, claramente, a diferença entre o coeficiente de transferência de calor dos diferentes fluidos para uma mesma velocidade mássica. Observa-se ainda que, devido à elevada viscosidade das misturas propileno/água e TyFoxit/água, o equipamento experimental operou satisfatoriamente em vazões mássicas acima de 60 g/s.

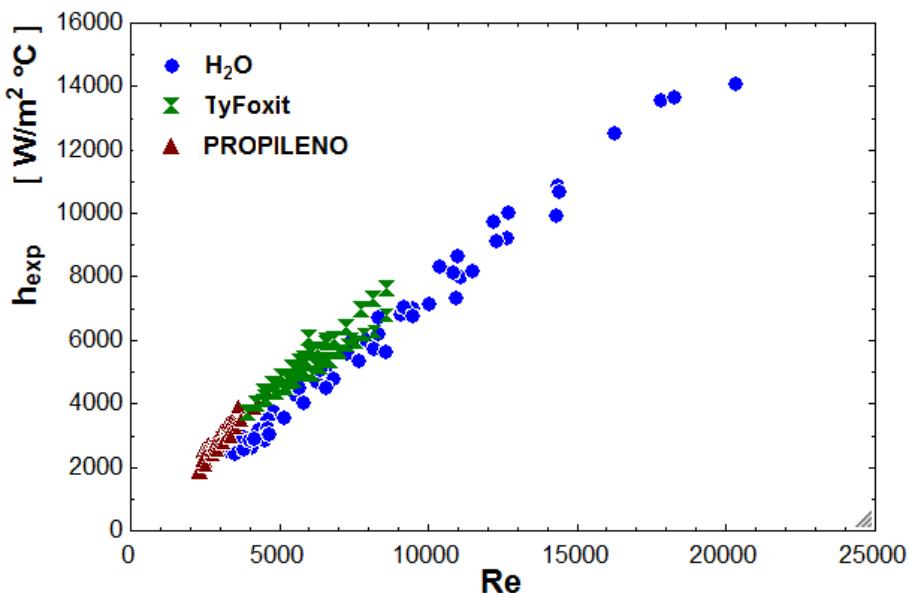


Figura 3.29 – Comparação dos resultados experimentais para  $h_{exp} \times Re$ .

Na Figura 3.29 os resultados experimentais levantados para o coeficiente de transferência de calor dos diferentes fluidos são expressos em função do número de Reynolds ( $h_{exp} \times Re$ ) e, neste caso, observa-se que devido à elevada viscosidade das misturas de propileno/água e de TyFoxit/água, para a faixa de vazões mássicas entre 60 e 100 g/s somente foram alcançados escoamentos com número de Reynolds de até 5000 e 9000, respectivamente.

De acordo com os resultados levantados nos testes preliminares, realizados com diferentes fluidos, indicam que o equipamento experimental responde às variações dos parâmetros de ensaio a serem adotados na análise experimental do coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O.

### 3.4 Tratamento dos Resultados Experimentais

Os resultados experimentais, levantados nas diversas campanhas de ensaios, foram tratados de acordo com o exposto a seguir. Inicialmente, será apresentado o procedimento para a avaliação das propriedades termofísicas do fluido em escoamento no tubo da ST e, posteriormente, o método para determinação do coeficiente de transferência de calor e da perda de carga. A avaliação do comportamento térmico e hidráulico dos fluidos foi levada a cabo, considerando o caso de escoamento monofásico em regime de transição e turbulento sob condição de fluxo

específico de calor constante e uniforme pela parede do tubo da ST.

### 3.4.1 Avaliação das propriedades termofísicas do fluido

Considerando que os efeitos de quaisquer pequenas oscilações na tensão de alimentação das fitas resistivas de aquecimento e na vazão mássica de fluido em escoamento sejam pouco representativos nos resultados e que estes parâmetros sejam ajustados elétrica ou mecanicamente, garantindo assim boa estabilidade, o critério para que se estabeleça um regime permanente centrou-se no comportamento da temperatura do fluido na entrada da ST e de sua variação durante o ensaio. Assim, embora envolvendo o estado de operação de todo o equipamento experimental, estabeleceu-se que o sistema estaria em regime permanente quando a temperatura de entrada do fluido na ST,  $T_{ent}$ , não apresentasse variação tendenciosa de mais de  $0,5^{\circ}\text{C}$  durante todo o tempo de aquisição de dados. O procedimento para o controle da temperatura de entrada está descrito na Seção (3.2.3) deste capítulo. Foram considerados testes válidos, com no mínimo 300 linhas de dados, isto é, 300 s, aqueles testes em que a variação da  $T_{ent}$  ao longo do ensaio, em nenhum momento tenha superado  $0,25^{\circ}\text{C}$  por segundo. Um exemplo dos dados de  $T_{ent}$  adquiridos em um ensaio específico é mostrado na Fig. 3.30.

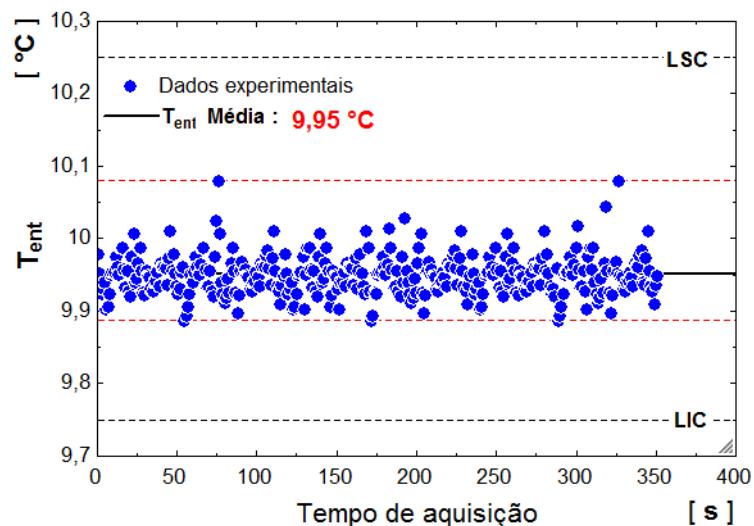


Figura 3.30 – Dados experimentais de  $T_{ent}$  para um ensaio específico ilustrando o sistema de controle da  $T_{ent}$  durante a aquisição de dados.

O diagrama esquemático ilustrado na Figura 3.31 mostra a simplificação experimental para que seja determinada a temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da ST, e

também a variação da temperatura do fluido entre a entrada e a saída da ST devido a transferência de calor por convecção. A temperatura média e a variação de temperatura do fluido são representadas por  $T_m$  e  $\Delta T_{es}$ , respectivamente. A temperatura do fluido na entrada e na saída da ST é medida por sensores de temperatura PT-100. Por sua vez a vazão mássica entregue pela bomba e o fluxo de calor controlado pela regulagem da tensão de alimentação (VARIVOLT) das fitas resistivas são medidos conforme descrito na Seção (3.2.3), e, aqui designados por  $\dot{m}$  e  $Q_{for}$ , respectivamente. Paralelamente a isso, também são medidas a pressão do escoamento do fluido na entrada,  $P_{ent}$ , e na saída,  $P_{sai}$ , bem como a diferença de pressão entre a entrada e a saída da ST,  $\Delta P_{exp}$ .

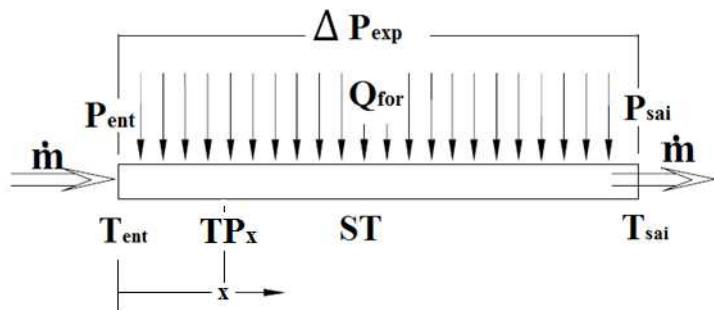


Figura 3.31 – Diagrama esquemático ilustrando a ST e as condições de vazão mássica de fluido, fluxo de calor e os pontos de medição da temperatura do fluido e da parede e os pontos de medição de pressão.

As propriedades termofísicas do fluido são todas dependentes da temperatura e, portanto, definiu-se a temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da ST como a temperatura de referência para a determinação das propriedades do fluido. Uma vez que são conhecidas tais temperaturas, a temperatura média do fluido durante o ensaio e a diferença de temperatura do fluido entre a entrada e a saída da ST são dadas pelas Eqs. (3.8) e (3.9), respectivamente.

$$T_m = \frac{T_{ent} + T_{sai}}{2} \quad (3.8)$$

$$\Delta T_{es} = T_{sai} - T_{ent}. \quad (3.9)$$

$T_m$  é a temperatura de referência para o cálculo das propriedades termofísicas do fluido, isto é,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $k$  e  $Pr$ . Todas as propriedades da água foram determinadas utilizando o programa computacional EES (Engineering Equation Solver) e, considerando a condição do fluido,

a partir das propriedades independentes temperatura e título como tendo os valores  $T_m$  e  $x = 0$ , respectivamente. Assim de posse dos dados de vazão mássica, quantidade de calor fornecida, da variação da temperatura e das propriedades do fluido foi feito o balanço térmico empregando a Eq. (3.3) e, conforme mostrado na Fig. 3.20, o isolamento térmico mostrou-se satisfatório.

### 3.4.2 Determinação do coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor foi determinado utilizando a Lei de Resfriamento de Newton, segundo a qual:

$$h = \frac{Q/A}{\Delta T} \quad (3.10)$$

onde, o numerador corresponde ao fluxo de calor específico,  $Q_{for}/A_{ST}$ , (potência elétrica sobre a área de aquecimento) e o denominador à diferença entre as temperaturas da superfície ou parede do tubo,  $TP_{(x)}$ , e a temperatura média (de mistura) do fluido,  $T_{m(x)}$  na mesma posição axial,  $x$ , a partir da entrada da ST,  $\Delta T = TP_{(x)} - T_{m(x)}$ .

A Figura 3.32 ilustra os dados medidos das temperaturas  $T_{ent}$ ,  $T_{sai}$ ,  $TP_{(x)}$  e os valores calculados para a  $T_{m(x)}$ . Também podem ser observados os resultados da leitura dos termopares na parede do tubo e a temperatura na entrada e na saída da ST bem como o os resultados do ajuste linear para  $TP_{(x)}$  e  $T_{m(x)}$ , referentes a cada posição axial  $x$ .

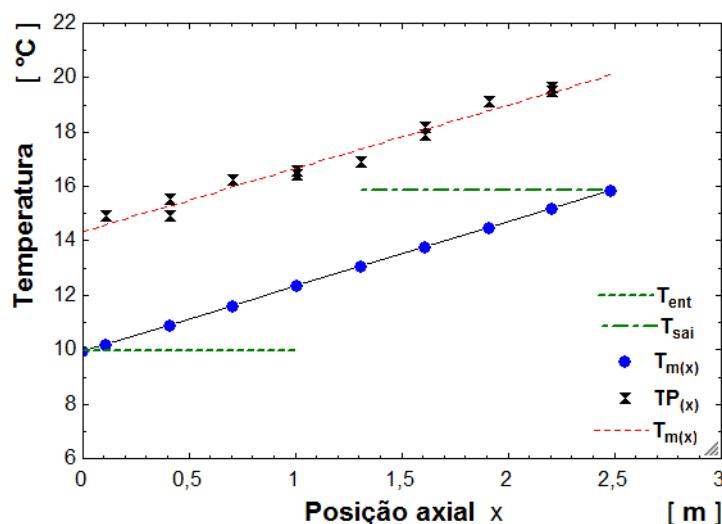


Figura 3.32 – Medidas de temperatura de um ensaio específico; temperatura da parede em diferentes posições axiais e temperatura do fluido na entrada e na saída da ST.

É importante observar que a leitura dos termopares na parede do tubo da ST apresentou bastante variação. Porém, um ajuste linear da leitura da temperatura nos diversos pontos resulta sempre numa reta com coeficiente angular (inclinação) muito próxima daquela obtida pelo ajuste linear da temperatura do fluido na entrada e na saída da ST,  $T_{m(x)}$  em relação a posição axial  $x$  a partir da entrada da ST. No caso do ensaio ilustrado na Fig. 3.32, tem-se as retas

$$T_{m(x)} = 2,3899 x + 9,9503 \quad (3.11)$$

e

$$TP_{(x)} = 2,326 x + 14,343. \quad (3.12)$$

Para uma primeira aproximação da avaliação do coeficiente de transferência de calor por convecção das amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de água em escoamento no tubo da ST, será adotada uma correção de 3,2% na quantidade de calor fornecida. Conforme pode ser observado no desenho esquemático da Fig. 3.31, também foram instalados termopares tipo T (cobre constantan) para medir a temperatura da parede do tubo em diferentes posições axiais,  $x$ , a partir da entrada da ST. As temperaturas da parede, como mencionado anteriormente, foram medidas em oito diferentes posições ao longo do tubo. Nesse sentido, foi possível avaliar o coeficiente de transferência de calor ao longo da seção de teste.

De modo que, conforme o exposto anteriormente, o coeficiente local de transferência de calor por convecção é determinado por

$$h_{(x)} = \frac{(1 - 0,032) \dot{Q}_{for}}{(TP_{(x)} - Tm_{(x)})}, \quad (3.13)$$

o uso da Equação (3.13), corrigindo o fluxo de calor devido às perdas para o ambiente permitiu o cálculo do coeficiente de transferência de calor sem que fossem utilizadas as propriedades das amostras de nanofluido de nanotubos de carbono a base de água testadas. No entanto, esta estratégia somente permitiu realizar a comparação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos e do fluido base em termos da vazão mássica e não em termos do número de Reynolds, como habitualmente é encontrado na literatura.

### 3.4.3 Cálculo da perda de carga

A perda de carga experimental foi avaliada por dois procedimentos diferentes, como mostrado anteriormente. O primeiro consiste na determinação direta por intermédio do transdutor diferencial de pressão, cujos dados, enquanto armazenados eram simultaneamente apresentados na tela de monitoramento (Fig. 3.18). O segundo, servindo como verificação, é resultante da diferença entre as pressões na entrada da seção de teste e na saída, medidas pelos transdutores de pressão. Como mostrado na Seção 3.3.2 deste capítulo, a verificação dos resultados foi realizada, também através da comparação destes com os resultados calculados pela Eq. (3.1), na qual o fator de atrito empregado foi aquele resultante da correlação de Petukhov (Eq. (3.2)) e também o da correlação de Blasius (Eq. (3.14)).

$$f = 0,3164 Re^{(-1/4)}. \quad (3.14)$$

## 3.5 Matriz de Experimentos

Desde o início da campanha de ensaios foi necessário construir uma planilha, denominada de Matriz de Experimentos, que incorporasse os parâmetros que seriam controlados durante os testes. Finalizados os testes preliminares, a avaliação dos resultados mostrou as melhores faixas de operação do equipamento experimental em termos da estabilidade hidrodinâmica e da faixa de variação das temperaturas envolvidas. Assim, para cada tipo de fluido ensaiado, os parâmetros controlados eram: a vazão mássica de fluido, a potência elétrica aplicada e a temperatura de entrada na seção de teste (Tabela 3.2).

Deve-se salientar que foram preparadas diferentes matrizes de experimentos ao longo do presente trabalho, todas elas, no entanto, consideraram sempre os parâmetros nominais de temperatura de entrada, potência elétrica aplicada e vazão mássica representadas por  $T_{ent_{NM}}$ ,  $Q_{for_{NM}}$  e  $\dot{m}_{NM}$ , respectivamente.

Tabela 3.2 – Planilha de experimentos para H<sub>2</sub>O - 01

Fluido	$T_{ent_{NM}} [^{\circ}C]$	$Q_{for_{NM}} [W]$	$\dot{m}_{NM} [g/s]$
$H_2O$	10	500	20 $\longmapsto$ 100
		700	20 $\longmapsto$ 100
		900	20 $\longmapsto$ 100
	15	500	20 $\longmapsto$ 100
		700	20 $\longmapsto$ 100
		900	20 $\longmapsto$ 100
	20	500	20 $\longmapsto$ 100
		700	20 $\longmapsto$ 100
		900	20 $\longmapsto$ 100

### 3.6 Análise de Incertezas

A avaliação da incerteza dos parâmetros secundários foi determinada diretamente pelo programa EES (Engineering Equation Solver), que utiliza o método proposto por Kline & Mc Clintock apud MOFFAT (1988), segundo o qual, se  $y$  for uma medida secundária dependente de  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  medidas independentes, isto é,

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (3.15)$$

e

$$y = y_m \pm \delta y, \quad (3.16)$$

e se cada um das medidas  $x_i$  for escrita como

$$x_i = x_{m_i} \pm \delta x_i, \quad (3.17)$$

onde,  $x_{m_i}$  é o valor da medida  $x_i$ , e  $\delta x_i$  é a incerteza de sua medida, a incerteza da medida  $y$  é dada por:

$$y = \sqrt{[(Sx_1)(\delta x_1)]^2 + [(Sx_2)(\delta x_2)]^2 + \dots + [(Sx_n)(\delta x_n)]^2}, \quad (3.18)$$

onde,  $Sx_i$  é a denominada sensibilidade de  $y$  com relação a medida  $x_i$ , dada por:

$$Sx_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}, \quad (3.19)$$

As incertezas propagadas para a avaliação do coeficiente de transferência de calor, por

exemplo, são afetadas pela precisão dos parâmetros medidos. Verificou-se, com base em uma análise dos termos da Eq. (3.18), que a principal componente das incertezas propagadas é a temperatura, sendo o efeito dos demais parâmetros, praticamente, desprezível. É interessante notar que uma melhor precisão na medida da temperatura permitiria a obtenção de uma menor incerteza na avaliação de parâmetros secundários, especialmente o coeficiente de transferência de calor. Entretanto, o uso de termopares limita a precisão da medida. Vale ressaltar que o intervalo de confiança adotado para as incertezas nas variáveis independentes foi de 95 % e esse valor será transportado às incertezas dos resultados.

A Tabela 3.3 apresenta um sumário das incertezas envolvidas na medida e avaliação dos distintos parâmetros.

Tabela 3.3 – Precisão e incertezas dos parâmetros envolvidos nos ensaios.

Parâmetro	Dispositivo	Precisão	Incerteza	
			mín	máx
Massa	Balança NTCs	$\pm 0,001 g$		
	Balança Líquido	$\pm 0,5 g$		
Comprimento	$L_{ST}$	$\pm 0,5 mm$		
	Posição $x$	$\pm 0,5 mm$		
	Diâmetro ST	$\pm 0,01 mm$		
Temperatura	PT-100	$\pm 0,5 ^\circ C$		
	Termopar	$\pm 0,20 ^\circ C$		
Vazão mássica	Coriolis	$\pm 0,15 \%$		
Pressão	Transdutor	$\pm 0,30 \%$		
	Transdutor diferencial	$\pm 0,25 \%$		
Potência elétrica	Corrente (Amperímetro)	$\pm 0,5 \%$		
	Tensão (Voltímetro)	$\pm 0,5 \%$		
Coef. de Transf. de calor			71,58	1495
Coef. de Atrito			0,0001947	0,0001719



# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Introdução

Com a finalidade de analisar o comportamento termo-hidráulico do nanofluido de nanotubos de carbono a base de água (NTCs/H<sub>2</sub>O) em escoamento no interior de um tubo circular reto e horizontal, foram realizados ensaios visando à transferência de calor e perda de carga. Durante o programa de doutoramento foram realizadas diversas baterias de ensaios que permitiram o registro de aproximadamente 900 pontos experimentais referentes à transferência de calor por convecção forçada e perda de carga para escoamento de diferentes fluidos em um tubo circular horizontal, envolvendo uma ampla faixa de condições operacionais. Os resultados experimentais referentes aos ensaios com as soluções de propileno-glicol/água, tyfoxit/água e água destilada, como apresentados no capítulo anterior, foram utilizados para a verificação do desempenho e validação do equipamento experimental. Além disso, durante o desenvolvimento deste trabalho foram produzidas cinco amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, cada uma delas idealizada para atender aos objetivos propostos para esse estudo, ou seja, a comparação do desempenho termo-hidráulico das referidas amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com o fluido base e destas entre si.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados com as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. A análise dos resultados será organizada, inicialmente, pela comparação das características termo-hidráulicas de cada uma das amostras de nanofluido com as da água, para as mesmas condições operacionais de ensaio e, em seguida,

serão apresentados e discutidos os resultados referentes à comparação das características de fluxo e de transferência de calor das diferentes amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, considerando a diferença na concentração de nanopartículas e a razão de aspecto dos nanotubos de carbono.

#### 4.2 Condições de Ensaio

Para a campanha de levantamento de dados das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram adotadas condições operacionais, tais como, a temperatura de entrada do fluido na ST, o fluxo de calor fornecido à parede do tubo da ST e a vazão mássica do fluido de forma que fosse possível proceder-se à análise através da comparação direta com os resultados obtidos dos ensaios realizados com a água destilada (fluido base). Os nanofluidos entraram no cenário científico no ano de 1995, quando do Choi e colaboradores buscavam intensificar o processo de transferência de calor para elementos ópticos e aparelhos de raios-X com elevadas taxas de calor no *Argonne National Laboratory* dos EUA e relataram melhorias significativas no desempenho de transferência de calor (CHOI, 1995). Desde então uma série relativamente ampla de nanofluidos foi desenvolvida, empregando-se diferentes tipos de nanopartículas e por intermédio de diferentes processos de preparação de nanofluidos.

No presente trabalho foram empregadas as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, descritas na Tabela 4.1. Todos os nanotubos de carbono de paredes multiplas (MWNTS - *Multi-walled Carbon Nanotubes*), embora, de diferentes características, foram fornecidas por *Nanostructured & Amorphous Materials Inc.* As características geométricas dos nanotubos, isto é, o comprimento,  $L$ , e o diâmetro,  $d$ , são aquelas informadas pelo fornecedor. Não há informação disponível quanto ao processo de purificação e ou funcionalização dos nanotubos de carbono adquiridos mas, segundo o fabricante, todas as nanopartículas foram produzidas pelo processo de deposição catalítica de vapor químico (CVD).

A Tabela 4.2 contempla as condições nominais de ensaio utilizadas para o levantamento dos dados referentes à transferência de calor e perda de carga para a água destilada (H<sub>2</sub>O) e para as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Conforme descrito no capítulo anterior, a seção de teste é composta por um tubo de latão com comprimento  $L_{ST} = 2480\text{ mm}$ , diâmetro interno  $D_i = 6,35\text{ mm}$  e parede com espessura de  $3,175\text{ mm}$ . Todos os ensaios foram realizados sob a

condição de contorno de fluxo de calor constante e uniforme pela parede do tubo por aquecimento através de resistências elétricas flexíveis, aderidas à parede do tubo, dissipando energia fornecida,  $Q_{for}$ . Também foram adotados como parâmetros nominais de ensaio a vazão mássica de fluido,  $\dot{m}$ , e a temperatura do fluido na entrada da seção de teste,  $T_{ent}$ .

Tabela 4.1 – Características das amostras de nanofluidos utilizadas no presente trabalho.

Nanofluido	Tipo de nanotubo	$L$ [ $\mu m$ ]	$d$ [nm]	$r = L/d$	$\phi$ [% massa]
NT01	MWNTs (Sol. 3%) <sup>(a)</sup> /500g	10 – 30	20 – 30	$r \cong 800$	$\phi = 0,50$
NT02	MWNTs (Disp.) <sup>(b)</sup> /7,5g	5 – 30	20 – 40	$r \cong 600$	$\phi = 0,25$
NT03	MWNTs (Disp.) <sup>(b)</sup> /15g	5 – 10	50 – 100	$r \cong 100$	$\phi = 0,50$
NT04	MWNTs (Disp.) <sup>(b)</sup> /15g	5 – 50	8 – 15	$r \cong 2400$	$\phi = 0,50$
NT05	MWNTs (Disp.) <sup>(c)</sup> /15g	5 – 15	20 – 40	$r \cong 300$	$\phi = 0,50$

(a) Solução aquosa concentrada de nanotubos de carbono de paredes múltiplas

*3 wt % Multi-walled Carbon Nanotubes in Water);*

(b) Nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados - dispersíveis

*(Dispersible Multi-Wall);*

(c) Nanotubos de carbono de paredes múltiplas assim como produzidos

*(Multi-walled Carbon Nanotubes).*

A campanha de ensaios permitiu o levantamento de, aproximadamente, 200 pontos experimentais envolvendo escoamento monofásico de água destilada. Para as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram realizados os ensaios conforme as diferentes condições operacionais descritas na Tabela 4.2. Inicialmente será apresentada uma breve descrição dos procedimentos empregados na preparação das amostras e também os resultados referentes às medições da viscosidade e da condutividade térmica das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Posteriormente, serão apresentados resultados da comparação entre a perda de carga do escoamento das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O e da água destilada (fluido base) e, finalmente, os resultados da comparação do coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com o da água destilada. Também será abordada uma comparação entre os resultados experimentais das diferentes amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O entre si, com o objetivo de se fazer inferências sobre a influência da concentração, das características geométricas dos nanotubos em suspensão e da natureza dos nanotubos de carbono (solução, funcionalizados e assim como produzidos).

Tabela 4.2 – Variação dos parâmetros operacionais de ensaio.

FLUIDO	$T_{ent_{NM}} [^{\circ}C]$	$Q_{for_{NM}} [W]$	$\dot{m}_{NM} [g/s]$
H <sub>2</sub> O			20
NT01			30
NT02	10	500	40
NT03	15	700	50
NT04	20	900	60
NT05			70
			80
			90
			100

### 4.3 Amostras de Nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O

Ainda é intensa a busca por uma rota segura de preparação de nanofluidos estáveis e homogêneos. O comportamento macroscópico da solução e suas propriedades dependem diretamente da homogeneidade e da estabilidade da suspensão. Os resultados encontrados na literatura descrevem diferentes técnicas de preparação e, em consequência disso, a comparação dos mesmos é dificultada.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram empregados nanotubos de carbono de diferentes espécimes, isto é, as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram preparadas a partir de uma solução aquosa concentrada de MWCNTs (3% em massa), nanotubos de carbono funcionalizados (OH ou COOH) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas assim como produzidos na forma de pó.

Nas subseções a seguir, são descritos os procedimentos empregados na preparação das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, as observações referentes à homogeneidade e estabilidade das amostras e os resultados experimentais da medição da viscosidade e da condutividade térmica, realizadas para levar a cabo a caracterização termofísica das mesmas.

#### 4.3.1 Preparação das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O

Todas as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram preparadas empregando-se a mesma rotina, entretanto, a partir de materiais de diferentes espécimes, isto é, a amostra denominada NT01, foi preparada a partir de uma solução concentrada (3% massa) de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em água. Por sua vez, no preparo das amostras NT02, NT03

e NT04, foram utilizados nanotubos de carbono facilmente dispersíveis, porém de diferentes características geométricas, isto é, diferentes razões de aspecto,  $L/d$ . Finalmente, a amostra NT05 foi produzida pela dispersão de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em forma de pó em água destilada.

Na Tabela 4.3 estão enumerados os materiais, isto é, as nanopartículas e o fluido base, e suas respectivas quantidades, empregados na preparação de cada uma das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O utilizadas na presente pesquisa.

Tabela 4.3 – Materiais e respectivas quantidades empregadas na preparação das amostras.

AMOSTRA	Nanopartículas	Fluido base	$\phi$ [% massa]	$\theta$ [% volume] <sup>(a)</sup>
NT01	MWNTs (Sol. 3%)/500 g	H <sub>2</sub> O /2500 g	0,50	0,24
NT02	MWNTs (Disp.)/7,5 g	H <sub>2</sub> O /2992,5 g	0,25	0,12
NT03	MWNTs (Disp.)/15 g	H <sub>2</sub> O /2985 g	0,50	0,24
NT04	MWNTs (Disp.)/15 g	H <sub>2</sub> O /2985 g	0,50	0,24
NT05	MWNTs /15 g	H <sub>2</sub> O /2985 g	0,50	0,24

(a) Considerando a densidade a granel dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas ( $\rho_{NTCs} = 2,1\text{ g/cm}^3$ ).

A preparação das amostras de nanofluido foi realizada seguindo o método de dois passos e o fluido base utilizado foi a água destilada. Os nanotubos de carbono, assim como produzidos, apresentam grandes agregados que estão fortemente entrelaçados e a aplicação de energia externa para romper estes aglomerados faz-se necessária. No presente estudo, a dispersão das nanopartículas na água destilada foi realizada com o auxílio do homogeneizador de alta pressão mostrado na Fig. 4.1.

O procedimento experimental utilizado no preparo das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O consiste das seguintes etapas:

1. Cálculo da quantidade de nanopartículas necessária para a preparação do nanofluido com uma concentração mássica de 0,5% e 0,25% para um total de 3000 g (volume mínimo necessário para o abastecimento da bancada experimental e reserva de amostra para caracterização).
2. As quantidades de nanopartículas e fluido base foram colocadas em bêqueres e as massas foram medidas com balanças de precisão (0,001 g e 5 g) fornecidas por Alfa Mare Ltda e Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda, respectivamente.

3. Adição das nanopartículas, devidamente pesadas, ao fluido base (água destilada - fornecida pelo laboratório de química da UFU) com o auxílio do homogeneizador de alta pressão. As nanopartículas foram sendo, gradativamente, adicionadas à água destilada enquanto esta era recirculada através do homogeneizador com pressão de  $20 \text{ MPa}$ .
4. Fim a adição de toda a massa de nanotubos reservada para a preparação da amostra, água destilada era adicionada e a mistura recirculada por um período de  $3 \text{ hs}$  com aumento gradual da pressão até atingir  $80 \text{ MPa}$ .

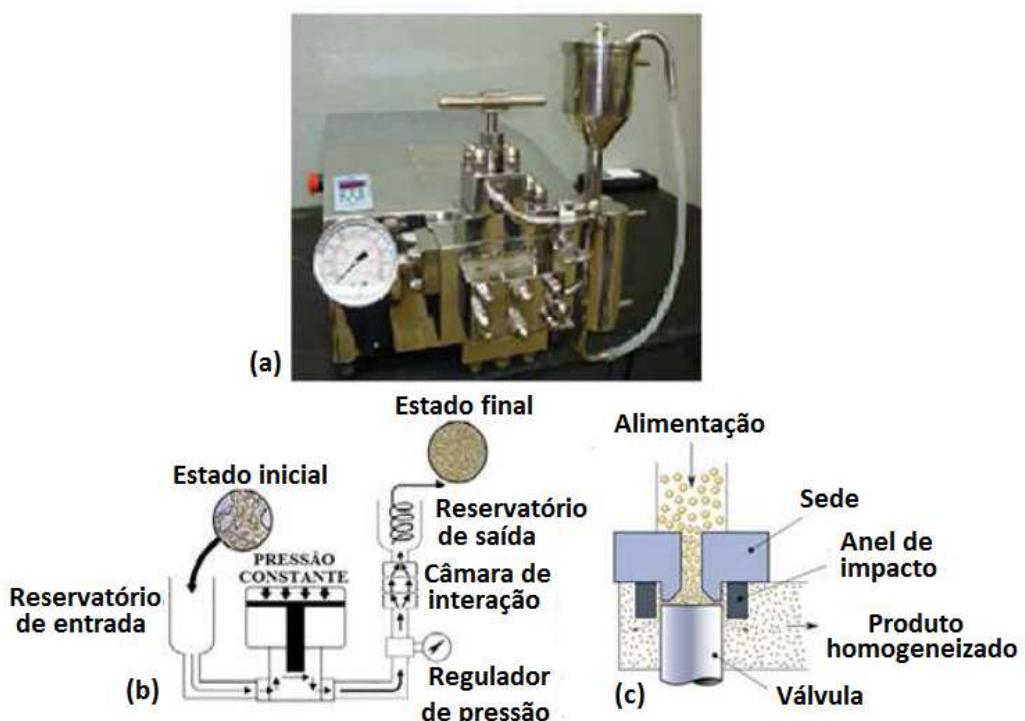


Figura 4.1 – (a) Homogeneizador de alta pressão ; (b) Esquema do processo de homogeneização de alta pressão; (c) Esquema da câmara de compressão.

É importante destacar que no preparo da amostra NT05, que empregou nanotubos de carbono de paredes múltiplas assim como produzidos na forma de pó, inicialmente, os nanotubos foram adicionados gradativamente à água com o auxílio de um equipamento de ultrassom. O equipamento mostrado na Fig. 4.2, é um equipamento de usinagem não-tradicional que emprega a técnica de ultrassom usado para gerar vasta variedade de características complexas em materiais avançados, isto é, materiais tais como aço endurecido, carbonetos, os rubis, quartzo, diamantes, vidro e cerâmica. Esse processo não usa ferramenta de corte tradicional, mas utiliza ondas sônicas para remover o material e não cria tensões residuais na peça de trabalho deixando a composição

química, a microestrutura e as propriedades físicas do material da peça de trabalho inalterada. Assim, o sonicador foi utilizado para quebrar as aglomerações de nanotubos de carbono formadas na suspensão.

O equipamento consiste de um oscilador (gerador de corrente de alta frequência) que converte a frequência da fonte de alimentação de energia de  $60\text{ Hz}$  à alta frequência ( $15\text{ kHz}$  a  $30\text{ kHz}$ ) que, por sua vez, é convertida em oscilações mecânicas com a ajuda de um magneto ou transdutor piezoelettrico (sonotrodo) que permanece em contato com a suspensão durante o processo transmitindo o efeito da vibração produzida para a suspensão. O ultrassom produz bolhas microscópicas no líquido, o que resulta em ondas de choque quando as bolhas entram em colapso. Por ser uma onda sônica, uma grande quantidade energia é fornecida ao fluido, fazendo com que sejam quebradas as aglomerações, aumentando a umectação e, finalmente, produzindo um fluido homogêneo e estável por um determinado período de tempo. Após a dispersão dos nanotubos com o auxílio do ultrassom, a solução resultante foi, em seguida, processada no homogeneizador de alta pressão seguindo a etapa (4) descrita na rotina de preparação das outras amostras.



Figura 4.2 – Equipamento de usinagem por ultrassom.

Pela análise visual das amostras de nanofluido, as mesmas apresentavam boa homogeneidade, e uma alíquota de cada amostra (Fig. 4.3) foi coletada e reservada para avaliação da estabilidade e posterior caracterização experimental das propriedades termofísicas.

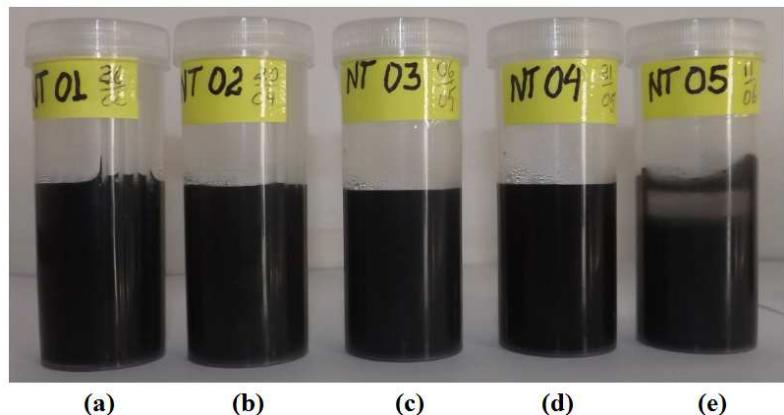


Figura 4.3 – Fotografias das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O.

#### 4.3.2 Avaliação da estabilidade e homogeneidade

Conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho (Seção 2.5), ainda não estão definidos padrões, critérios e técnicas para a medição da estabilidade dos nanofluidos. Entre os métodos de avaliação da estabilidade são destacados: métodos de sedimentação e centrifugação; análise do potencial Zeta e análise de absorção espectral UV. Porém, nenhum destes métodos foi empregado, uma vez que esta análise não foi prevista nos objetivos deste trabalho, no entanto, são aqui relatadas algumas observações registradas durante o manuseio das amostras de NTCs/H<sub>2</sub>O.

O resultado da aglomeração de nanopartículas não é somente a precipitação (deposição) e o possível entupimento de canais de escoamento, mas também, a possível diminuição da condutividade térmica do nanofluido, além da alteração de outras propriedades. Assim, a investigação sobre a estabilidade é também uma questão-chave, uma vez que influencia nas propriedades dos nanofluidos. Portanto, é necessário estudar e analisar os fatores de influência na estabilidade dos nanofluidos.

As amostras foram apartadas e deixadas em repouso. É possível observar que a amostra NT01, preparada a partir da diluição de uma solução aquosa concentrada de nanotubos de carbono de paredes múltiplas permaneceu estável por 8 meses. O mesmo ocorre com as amostras NT02, NT03 e NT04, preparadas pela dispersão de nanotubos de carbono funcionalizados (*Dispersible Multi-Wall*), estáveis após cerca de 6 meses da preparação. Por sua vez, a amostra NT05, preparada a partir da dispersão de nanotubos de carbono de paredes múltiplas na forma de pó, assim como produzidos, apresentou grave sedimentação acusando falta de estabilidade e

homogeneidade em cerca de 20 horas.

A Fig. 4.4 mostra as fotos da amostra NT05, ao final de cada uma das etapas, isto é, após a dispersão dos nanotubos de carbono na água com o auxílio do sonicador, após a recirculação da suspensão pelo homogeneizador de alta pressão e finalmente, após ter sido aplicada no circuito termo-hidráulico do equipamento experimental para a realização dos ensaios.

Na sequência de fotos, uma vez que a sedimentação das partículas ocorreu, é possível observar também que parece ter havido alteração na concentração de nanopartículas após cada etapa do manuseio das nanopartículas, sendo mais evidente na observação da Fig. 4.4 (d), onde é grande a diferença no nível de precipitado. Porém, isto pode ser decorrência de uma redução drástica no tamanho dos aglomerados, de forma que, o volume final do precipitado seja menor.

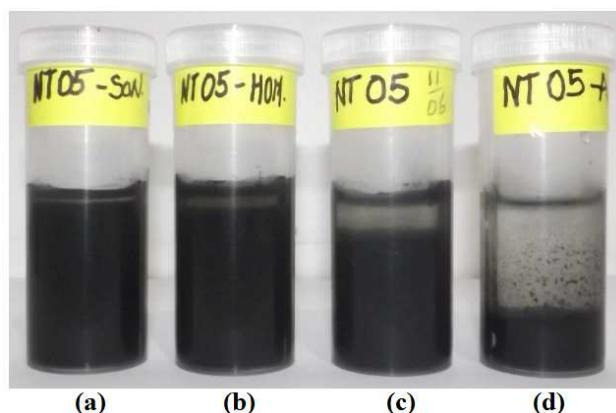


Figura 4.4 – Imagens da amostra NT05: (a) sonicada; (b) homogeneizada; (c) após 24 horas depois de preparada (d) após ter sido submetida ao circuito do equipamento experimental.

Cabe também, ressaltar que foi realizado o registro da ocorrência de alterações na estabilidade das amostras depois de terem sido submetidas aos testes no equipamento experimental para a avaliação da perda de carga e da transferência de calor. Mesmo tendo sido preparadas seguindo a mesma rotina, porém com nanotubos de carbono diferentes só nas características geométricas, as amostras NT02, NT03 e NT04, depois de aplicadas apresentaram comportamentos diferentes quanto à estabilidade. Como pode ser observado na Fig. 4.5, a estabilidade e homogeneidade da amostra NT04 degradaram-se completamente após ter sido submetida aos ensaios termo-hidráulicos. Isto é atribuído, possivelmente, às grandes e rápidas variações de temperatura as quais a amostra tenha sido sujeita durante os procedimentos operacionais realizados para atingir as condições desejadas para o ensaio propriamente dito.

Em relação à homogeneidade das suspensões coloidais de nanotubos de carbono a base de água, é possível visualizar aglomerados de nanotubos de carbono, mesmo após o processo de homogeneização por alta pressão. Os agregados tornam-se mais nítidos quando aderidos à parede do recipiente e em alguns casos atingem tamanhos na ordem de milímetros.



Figura 4.5 – Imagens da amostra NT04: (a) Como preparada; (b) Após ter sido aplicada ao equipamento experimental para os ensaios termo-hidráulicos.

No entanto, embora a amostra NT05 apresente grave sedimentação (Figura 4.4), uma breve agitação do recipiente torna a suspensão, aparentemente homogênea. Entretanto a sedimentação torna a ocorrer muito rapidamente conforme pode ser observado na sequência de fotografias da Fig. 4.6, onde, são apresentadas imagens da amostra NT05, imediatamente depois de agitada (Fig. 4.6(a)) e em intervalos de tempo de 5 e 10 minutos após ter sido agitada e colocada em repouso.

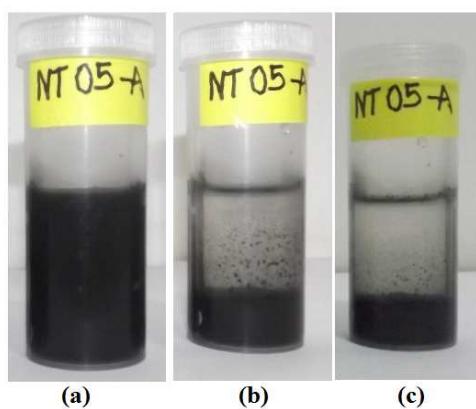


Figura 4.6 – Imagens da amostra NT05:(a) assim que agitada; (b) e (c) nos tempos de 5 e 10 minutos após ter sido agitada.

Da mesma forma que ocorreu com a amostra NT05, a amostra NT04, cuja estabilidade

foi degradada após ter sido submetida ao circuito termo-hidráulico do equipamento experimental, torna-se aparentemente homogênea após breve agitação. No entanto a precipitação é significativamente mais lenta do que a da amostra NT05, levando cerca de 24 horas para precipitar totalmente conforme pode ser visto na sequência de fotos da Fig. 4.7.

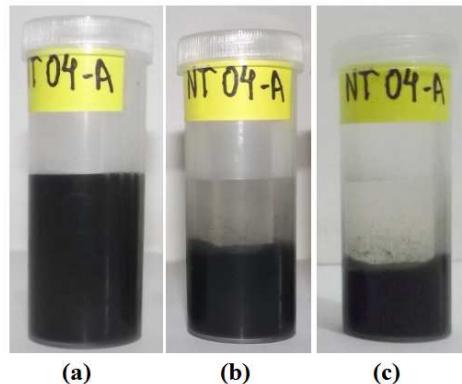


Figura 4.7 – Imagens da amostra NT04: (a) recém agitada; (b) e (c) após 12 e 24 horas depois de ter sido agitada

#### 4.4 Propriedades Termofísicas das Amostras

Antes de se tentar aplicar nanofluidos em sistemas de transferência de calor, inicialmente é necessário conhecer suas propriedades termofísicas, especialmente, o calor específico, a condutividade térmica e a viscosidade. Muitos pesquisadores têm utilizado correlações bem conhecidas para prever as propriedades termofísicas de nanofluidos e outros tantos mediram essas propriedades. Observou-se que a maioria dos modelos convencionais não consegue prever, com precisão, as propriedades térmicas e físicas dos nanofluidos, especialmente no caso da viscosidade e do calor específico. Na verdade, isto conduz a uma grande discrepância entre os dados experimentais e os calculados para as propriedades do fluido, que por sua vez resulta na obtenção de resultados imprecisos para o coeficiente transferência de calor, fator de atrito do escoamento e do índice de desempenho do sistema.

Devido à sua estrutura única, novas propriedades e potenciais aplicações, os nanotubos de carbono (NTCs) têm atraído grande atenção desde a sua descoberta. As propriedades térmicas de nanotubos de carbono são de interesse para a ciência básica, bem como para o desenvolvimento tecnológico de aplicações. Até o presente momento estudos experimentais das propriedades de

transporte térmico de nanotubos de carbono ainda são incipientes. Os resultados obtidos em relação às propriedades físicas e de transporte térmico de um NTC individual, de matrizes de NTCs, de outras nanoestruturas de NTCs e de compósitos contendo NTCs, além de escassos, são inconsistentes e muitas vezes contraditórios. As críticas recaem, na maior parte das vezes, sobre as técnicas de medição empregadas e também sobre a deficiente caracterização das amostras.

Assim, embora o propósito deste trabalho tenha sido o de avaliar o comportamento termo-hidráulico dos nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, do ponto de vista macroscópico, através da comparação entre os resultados experimentais obtidos para a água e para sua versão nanofluidica baseada em NTCs, também foram realizadas medições da condutividade térmica e da viscosidade das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Por sua vez, a massa específica e o calor específico das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram determinadas a partir de modelos clássicos.

#### 4.4.1 Massa específica

A massa específica das amostras de nanofluido foi determina com base no princípio físico da regra de mistura. Como tal, pode ser representada como:

$$\rho_{nf} = \left( \frac{m}{V} \right)_{nf} = \frac{m_{fb} + m_p}{V_{fb} + V_p} = (1 - \theta)\rho_{fb} + \theta\rho_p, \quad (4.1)$$

ou

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_p, \quad (4.2)$$

onde os subscritos *nf*, *fb* e *p* referem-se ao nanofluido, fluido base e nanopartículas, respectivamente,  $\theta = V_p/(V_{fb} + V_p)$  e  $\phi = m_p/(m_{fb} + m_p)$  são, a concentração em volume é a fração em massa de nanopartículas, respectivamente. No entanto, todos os modelos até agora apresentados levam em conta a fração em volume de nanopartículas, mas, em nenhum momento são descritos os critérios para a medição do volume das nanoparticulas na forma de pó.

Notadamente, na Eq. (4.2) foram empregados os valores de massa específica da água como sendo aqueles fornecidos pelo *EES* e para a massa específica dos nanotubos de carbono foi adotada aquela referenciada pelo fabricante ( $\rho_{CNTs} = 2,1\text{ g/cm}^3$ ).

Na Figura 4.8 são apresentados os valores das massas específicas das amostras de

nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O preparadas com concentração em volume de nanopartículas  $\theta = 0,24\%$  e  $\theta = 0,12\%$ , em comparação com a densidade do fluido base, H<sub>2</sub>O, em função da temperatura, calculados a partir da Eq. (4.1) considerando a concentração volumétrica de nanopartículas.

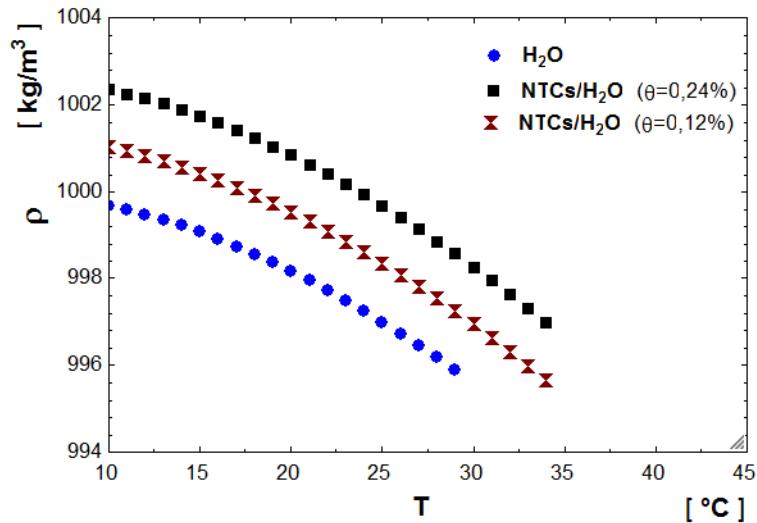


Figura 4.8 – Comportamento da massa específica da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O em função da variação da temperatura do fluido.

É possível verificar que o modelo clássico para a densidade efetiva da versão nanofluídica (Eq. (4.1)) depende, em alto grau, da massa específica das nanopartículas a granel. A figura também mostra que a variação da massa específica efetiva do nanofluido com a temperatura acompanha o comportamento do fluido base. Isto ocorre devido ao fato de não ter sido considerada qualquer variação na massa específica das nanopartículas. Observa-se ainda que, embora tenham sido produzidas e ensaiadas outras amostras, somente a amostra NT02 apresenta concentração volumétrica de nanopartículas,  $\theta = 0,12\%$ , e, portanto, todas as outras amostras apresentam, teoricamente, a mesma massa específica.

#### 4.4.2 Calor específico

O calor específico é um dos principais parâmetros para a avaliação do comportamento da transferência de calor de fluidos. No entanto, medições experimentais do calor específico de nanofluidos são pouco relatadas. No presente trabalho, o calor específico foi descrito a partir da regra de mistura considerando a concentração volumétrica de partículas na suspensão (Eq. (4.3)).

$$c_{p_{nf}} = (1 - \theta)c_{p_{fb}} + \theta c_{p_p}, \quad (4.3)$$

Neste estudo, para a determinação do calor específico das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, na Eq. (4.3) foram empregados os valores do calor específico da água como sendo aqueles fornecidos pelo *EES* e para o calor específico dos nanotubos de carbono a granel o valor adotado foi de 710 J/kg °C.

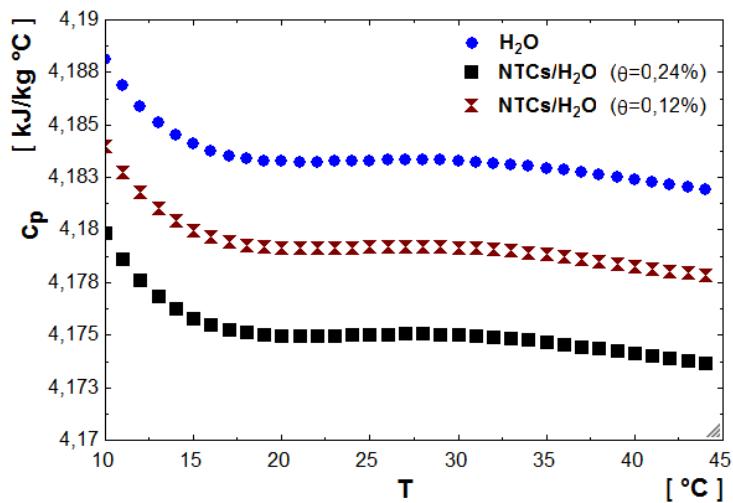


Figura 4.9 – Comportamento do calor específico da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O em função da variação da temperatura do fluido.

a Figura 4.9 são apresentados os valores do calor específico das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O preparadas com concentração em volume de nanopartículas  $\theta = 0,24\%$  e  $\theta = 0,12\%$ , em comparação com o calor específico da água, em função da temperatura do fluido, calculados a partir da Eq. (4.3) considerando a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão,  $\theta$ .

O mesmo modelo utilizado na predição da massa específica foi aqui empregado, e, portanto, nenhuma novidade surge da análise destes resultados, isto é, o modelo considera somente a propriedade em questão, ( $c_p$ ), e a concentração em volume de nanopartículas na suspensão. Pode ser visto na figura que o calor específico do nanofluido varia, com a temperatura, da mesma forma que o fluido base.

A Eq. (4.4) tem sido também proposta como um modelo que se ajusta melhor aos resultados experimentais por levar em conta a massa específica dos componentes envolvidos na suspensão (KHANAFER E VAFAI, 2011).

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1 - \theta)(\rho c_p)_{fb} + \theta(\rho c_p)_p}{(1 - \theta)\rho_{fb} + \theta\rho_p}, \quad (4.4)$$

Na Figura 4.10 são apresentados os valores do calor específico das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O ( $\theta = 0,24\%$  e  $\theta = 0,12\%$ ) em comparação com o calor específico do fluido base, H<sub>2</sub>O, em função da temperatura do fluido, calculados a partir da Eq. (4.4) considerando a concentração volumétrica de nanopartículas e em termos da densidade das mesmas,  $(\rho c_p)_p$ .

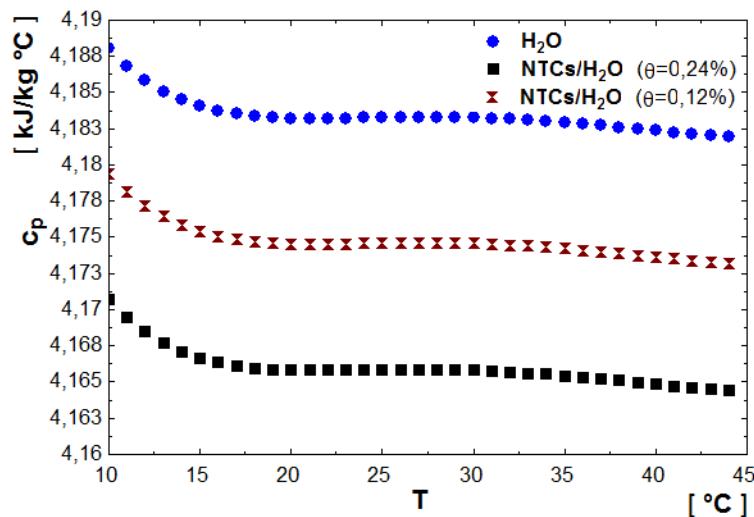


Figura 4.10 – Comportamento do calor específico da água e das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O em função da variação da temperatura, segundo a Eq. (4.4).

Como pode ser observado, o resultado decorrente da Eq. (4.4) resulta num valor significativamente menor para o calor específico da suspensão em relação aos valores resultantes da Eq. (4.3) (Fig. 4.9). Alguns autores atribuem a este reduzido  $c_p$ , a responsabilidade por alterações, experimentalmente encontradas, no comportamento térmico dos nanofluidos.

#### 4.4.3 Viscosidade

A viscosidade de nanofluidos também tem sido escopo de muitos trabalhos de pesquisa teórica, numérica e experimental. Como seria de se esperar, a adição de nanopartículas sólidas ao fluido base aumenta a viscosidade da suspensão em relação ao fluido base. Com vistas ao desenvolvimento de pesquisa básica e desenvolvimento da tecnologia para aplicações de nanofluidos em sistemas de transferência de calor é essencial determinar a viscosidade e o comportamento reológico dos nanofluidos para que se possa calcular a queda de pressão e o coeficiente de trans-

ferência de calor. Assim, tem sido proposta uma grande quantidade de modelos para a previsão da viscosidade de soluções sólido-líquido. A maioria destes modelos é baseada na teoria de Einstein (1906), que propôs um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Navier-Stokes. No entanto, a critica mais contundente a esses modelos reside no fato de que eles ignoram a natureza das nanopartículas, isto é, para uma mesma concentração e fluido base, dois nanofluidos produzidos com nanopartículas diferentes apresentariam a mesma viscosidade. Outros modelos, conforme apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho, consideram outros parâmetros tais como; o movimento Browniano, a velocidade relativa entre as nanoparticulas e o fluido base.

Também são controversos e muito criticados os resultados experimentais decorrentes da medição da viscosidade de nanofluidos, segundo as técnicas de medição empregadas para fluidos puros. Entre os principais equipamentos utilizados podemos destacar: Viscosímetro tipo pistão, Viscosímetro rotacional e Viscosímetro capilar.

Neste trabalho, as medições da viscosidade das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foram realizadas em um reômetro Brookfield LDDV-IIIU, tipo cone-placa, disponível no laboratório de refrigeração da EESC-USP. O equipamento mostrado na Fig. 4.11 mede a tensão de cisalhamento da amostra a partir de uma taxa de deformação imposta, elém, de determinar o torque necessário para girar o elemento cônico (spindle).



Figura 4.11 – Reômetro utilizado nos experimentos (Fonte: (OLIVEIRA, 2012)).

Devido ao fato de que, aparentemente, a viscosidade das amostras era muito próxima da viscosidade da água, o reômetro foi calibrado com água destilada ( $\mu_{H_2O} = 0,89\text{ cP}$ ) e o elemento cônico utilizado na realização das medições foi o spindle CPE-40, requerendo uma amostra de 0,5 ml. O sistema registra os dados de temperatura, tensão de cisalhamento, taxa de

deformação e viscosidade dinâmica a uma taxa de 25 dados por segundo. O conjunto cone-placa é acoplado a um banho térmico, permitindo a medição da viscosidade em diferentes temperaturas.

Cada amostra também teve a viscosidade medida três vezes em cada uma das temperaturas ensaiadas. Os resultados médios obtidos e o aumento médio em relação a água são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Viscosidade dinâmica para as amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O -  $\mu$  [cP].

AMOSTRA	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	Aumento médio
NT01	1,73	1,48	1,31	1,20	1,08	16,70 %
NT02	1,623	1,41	1,22	1,10	0,99	8,60 %
NT03	1,76	1,51	1,30	1,20	1,09	17,80 %
NT04	1,66	1,44	1,27	1,13	1,02	11,60 %
NT05	1,73	1,56	1,35	1,21	1,10	19,20 %
H <sub>2</sub> O	1,52	1,31	1,14	1,00	0,89	

Pode-se observar que a viscosidade dos nanofluidos é superior à da água, variando numa faixa de 8 a 20 % maior que a do fluido base. Além disso, o erro associado a cada medida é de 0,4 cP (1 % do fundo de escala do equipamento, que é de 3 cP, mais 1 % do valor medido).

Na Figura 4.12 são ilustrados os resultados experimentais para a viscosidade das diferentes amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O em diferentes temperaturas.

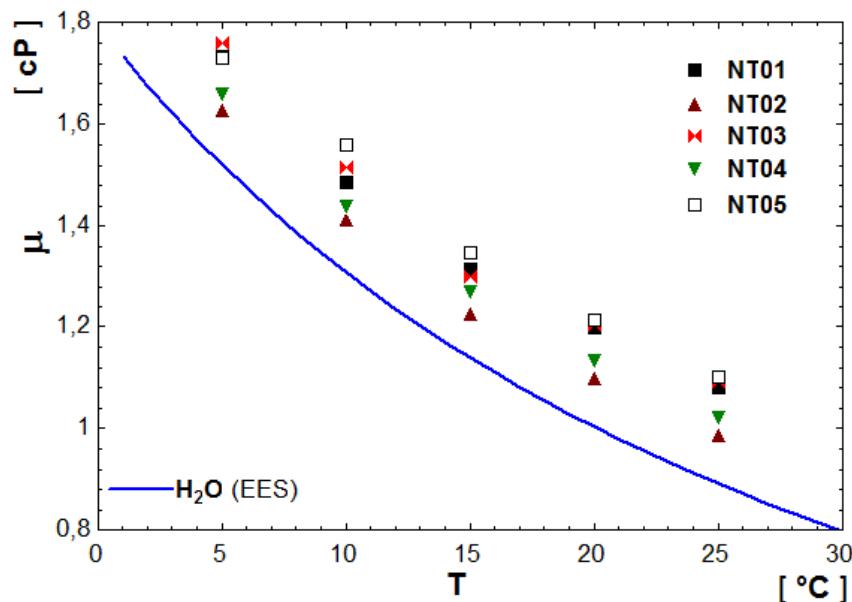


Figura 4.12 – Resultados experimentais: viscosidade das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O.

É importante observar que a amostra NT02, de menor concentração de nanotubos dispersos ( $\phi = 0,25\%$ ), apresentou um menor acréscimo na viscosidade como seria de esperar.

No entanto, também é possível observar uma grande diferença nas medidas da viscosidade das amostras NT03 e NT04, ambas com mesma concentração de nanotubos dispersos ( $\phi = 0,50\%$ ).

Como todas as três amostras, NT02, NT03 e NT04, foram produzidas a partir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall Carbon Nanotubes), é natural que aquela com menor fração em massa de nanoparticulas (NT02 /  $\phi = 0,25\%$ ) apresente a menor viscosidade efetiva. Entretanto, a grande discrepância entre os resultados encontrados para as amostras NT03 e NT04, uma diferença média de 6,2%, não se justifica pela variação da fração em massa de nanotubos, sendo devida, possivelmente, à diferença na razão de aspecto,  $r = L/d$ , dos nanotubos, conforme a Tabela 4.1.

#### 4.4.4 *Condutividade térmica*

A possibilidade de incremento da condutividade térmica das versões nanofluidicas dos fluidos convencionais de transferência de calor tem sido o principal motivador para grande número de pesquisas. Esta propriedade tem sido alvo de estudo por diversos autores, tanto em caráter teórico quanto experimental, resultando em publicações de teorias elaboradas para descrever os mecanismos por trás do aumento da condutividade térmica de nanofluidos em relação ao fluido base. Entre os diversos trabalhos publicados envolvendo a condutividade térmica de nanofluidos, os seguintes fatores são citados como aqueles que mais influenciam a condutividade térmica: concentração de nanopartículas, natureza das nanopartículas e do fluido base, tamanho e forma das nanopartículas, temperatura, aditivos e pH (acidez). Alguns autores explicam o fenômeno do incremento da condutividade térmica das versões nanofluidicas, resultantes da adição de nanopartículas, como sendo devido à nanocamada, movimento Browniano, aglomerações e potencial interparticular.

Da mesma forma que ocorre com a viscosidade, diversos modelos para predizer a condutividade térmica de nanofluidos estão sendo apresentados por diferentes grupos de pesquisa. Dado que a idéia de dispersar partículas sólidas de elevada condutividade térmica em fluidos, com o objetivo de modificar suas propriedades, não é nova, alguns modelos clássicos para a condutividade térmica de misturas são também, frequentemente, utilizados para estimar esta propriedade. Além disso, modelos clássicos tais como os modelos de Maxwell e de Hamilton-

Crosser, têm servido de base na derivação de novos modelos, cuja característica comum reside no fato de sempre expressarem a condutividade efetiva dos nanofluidos, isto é, como um parâmetro relativo, tal que:

$$k_{ef} = \frac{k_{nf}}{k_{fb}}, \quad (4.5)$$

O modelo de Maxwell, Eq. (4.6), desenvolvido para predizer a condutividade de misturas sólido-liquido, é considerado bastante conservador devido às hipóteses de que o meio é estatisticamente homogêneo, sem movimento relativo entre as partículas e o fluido, além disso, pressupõe partículas esféricas de tamanho micro e milimétrico.

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\theta \left( \frac{k_p - k_{fb}}{2k_{fb} + k_p - \theta(k_p - k_{fb})} \right) k_{fb}, \quad (4.6)$$

O modelo proposto por Hamilton e Crosser, Eq. (4.7), é uma modificação do modelo de Maxwell e introduz um fator de forma,  $\psi$ , tornando o modelo sensível ao formato da partícula.

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\psi^{-1}\theta \left( \frac{k_p - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_p - \theta(k_p - k_{fb})} \right) k_{fb}, \quad (4.7)$$

Além destes modelos, outros mais recentes, como mencionado na revisão bibliográfica deste trabalho, introduzem outros elementos que levam em consideração algumas variáveis tais como a espessura e a condutividade da nanocamada, a influência da temperatura, outros formatos de partículas, movimento relativo das partículas e do fluido e etc.

Alguns resultados de medições experimentais da condutividade térmica de nanofluidos estão disponíveis na literatura. Assim como ocorre com os resultados experimentais da medição da viscosidade, os resultados referentes à condutividade também são criticados e controversos. No entanto, grande parte das discrepâncias é atribuída às falhas na descrição dos nanofluidos, isto é, a comparação dos resultados fica prejudicada em função de grandes diferenças nas características dos nanofluidos que resultam de diferentes técnicas de preparação, da presença ou não de surfactantes ou outros aditivos, do uso de nanopartículas funcionalizadas, falhas na descrição do tamanho, forma e propriedades termofísicas das nanopartículas (individuais ou a granel) e, ainda, da formação ou não de aglomerados de nanopartículas. A outra fonte de divergências é aquela

que questiona a capacidade dos instrumentos de medição convencionais, isto é, aqueles instrumentos desenvolvidos para a medição da condutividade térmica de líquidos puros, serem eficazes para a medição da condutividade térmica de nanofluidos, devido à presença de nanopartículas e, consequentemente, de novos fenômenos exclusivos de materiais nesta escala.

Entre os trabalhos experimentais de medição da condutividade térmica de nanofluidos os principais métodos empregados são: Método 3w, Forced Rayleigh Scattering, Guarded hot plate, Parallel hot plates, transient hot wire, steady state coaxial cylinder, KD2 PRO (transient line heat source).

A condutividade térmica das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foi medida pelo método do fio quente transiente (THW), também conhecido como sonda linear. Foi utilizada a sonda Hukseflux TP-08 (Fig. 4.13), 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/mK. A aquisição de dados e controle foi efetuada utilizando placas de aquisição da *National instruments* e programação em Labview. O sistema consiste de um chassi NI PXI-1000B, um controlador embutido NI PXI-8170 e uma placa de aquisição de 24 bits NI PXI-4351 para aquisição dos dados de temperatura.



Figura 4.13 – Sonda Hukseflux TP-08 (Fonte: (OLIVEIRA, 2012)).

O modelo Hukseflux TP08 é uma sonda que oferece a possibilidade de efetuar uma medição prática e rápida da condutividade térmica (ou resistividade térmica) do meio no qual ela é inserida. As normas da American Society for Testing and Materials (ASTM) e do Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) descrevem métodos comprovados para determinar a condutividade térmica de materiais. ASTM D 5334-00 e 5930-97 D e IEEE STD 442-1981 para métodos de teste padrão especificam o uso de sondas de estado não-estacionário (NSSP) em

várias aplicações. Em geral, este tipo de dispositivo consiste de um fio de aquecimento, o que representa uma fonte linear perfeita, e um sensor de temperatura capaz de medir a temperatura dessa fonte.

O método do fio quente transiente (THW) baseia-se na medição do aumento da temperatura de uma fonte linear de calor (fio quente). A sonda, mergulhada no líquido de teste e em equilíbrio térmico com este, está conectada a uma fonte que produz um fluxo de calor constante ao longo da agulha, que funciona, ao mesmo tempo, como uma resistência elétrica e como um termômetro (Fig. 4.14). Considerando o fluxo de calor constante e uniforme ao longo da amostra, a condutividade térmica do líquido pode ser derivada diretamente da variação da temperatura em um intervalo de tempo conhecido, pois o aumento transiente da temperatura no fio, medido através da sua resistência elétrica, depende da condutividade térmica do líquido circundante utilizado no teste. Após um curto período transitório, o aumento da temperatura,  $\Delta T$ , apenas depende da potência do aquecedor,  $Q$ , e da condutividade térmica do meio,  $k$ . A condutividade térmica é então determinada a partir da região linear do gráfico  $\Delta T \times \ln(t)$  e utilizando a Eq. (4.8), visto que  $Q$  é, aproximadamente, constante durante o experimento.

$$\Delta T = \left( \frac{Q}{4\pi k} \right) \ln(\Delta t), \quad (4.8)$$

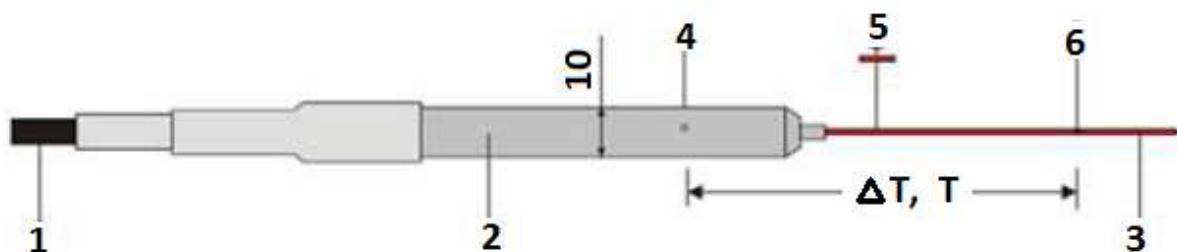


Figura 4.14 – Representação esquemática da sonda de estado não estacionário: A sonda consiste de uma agulha (3) com uma única junção de termopar (6) e um fio de aquecimento (5). Na base, (2), está montado um sensor de temperatura, (4).

Foram realizadas medições de condutividade térmica para as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O a temperatura ambiente ( $T = 22,3^{\circ}\text{C}$ ). A sonda, previamente calibrada para a água ( $k = 0,600 \text{ W/mK}$ ), foi totalmente imersa no fluido e após ligar o circuito elétrico, a temperatura foi medida durante um tempo superior a 50 segundos. Três testes foram executados para cada uma das amostras analisadas. Em seguida, também foram realizadas medições em

outras três temperaturas, isto é, em temperaturas de 15, 20 e 25 °C.

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios obtidos e a Figura 4.15 ilustra os resultados experimentais para a condutividade térmica das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O segundo as diferentes temperaturas do fluido no início das medições.

Tabela 4.5 – Condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O e da água destilada em W/m°C.

AMOSTRA	15 °C	20 °C	22,3 °C	25 °C	Aumento médio
NT01	0,796	0,803	0,814	0,821	37,7 %
NT02	0,613	0,628	0,626	0,630	6,3 %
NT03	0,628	0,638	0,642	0,647	8,8 %
NT04	0,678	0,683	0,693	0,693	17,0 %
NT05	0,837	0,846	0,862	0,863	45,1 %
H <sub>2</sub> O	0,577	0,586	0,590	0,595	

A análise dos dados da tabela 4.5 indica um aumento da condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com a temperatura, que acompanha a variação da condutividade térmica do fluido base. Porém há grande variação nos resultados das medições da condutividade térmica das amostras, principalmente entre aquelas preparadas com nanotubos de carbono funcionalizados.

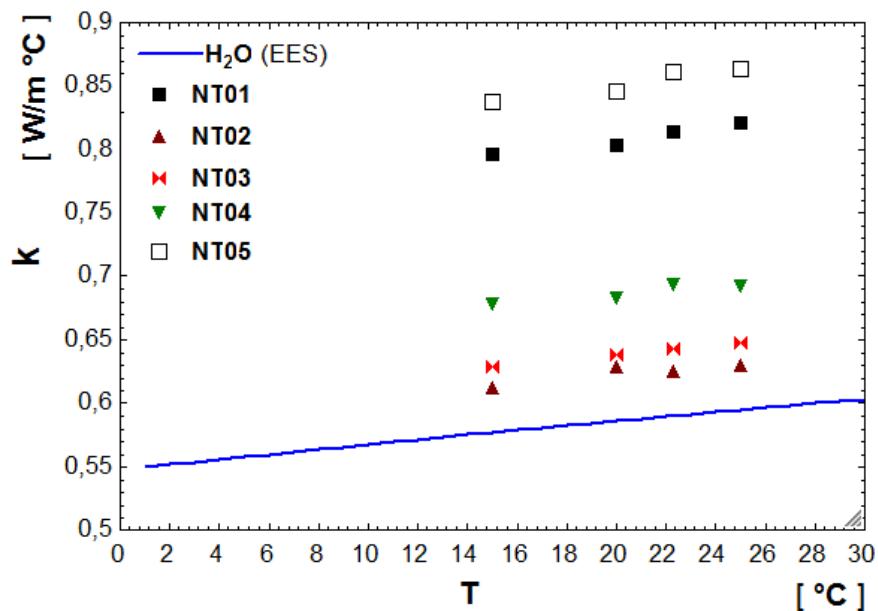


Figura 4.15 – Resultados experimentais para a condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O

Novamente, os resultados da medição da propriedade da amostra NT02, preparada com a menor concentração em massa de nanotubos dispersos,  $\phi = 0,25\%$ , apresentou menor

condutividade térmica. Porém, a amostra NT03, preparada com a mesma fração em massa de nanopartículas que a amostra NT04, ambas produzidas com a dispersão de nanotubos de carbono funcionalizados, apresentaram valores medidos para a condutividade térmica significativamente diferentes, e neste caso, ao contrário da viscosidade, foi a amostra NT03 que apresentou menor incremento da condutividade térmica em relação ao fluido base, sendo que a diferença média entre a condutividade térmica das amostras é de 8,2 %.

Observa-se pela Figura 4.15 que a amostra NT03 apresentou menor incremento da condutividade térmica em relação ao fluido base. Por sua vez, as amostras NT01 e NT05, apresentaram aumento significativo na condutividade térmica em relação ao fluido base.

Da análise das Figuras 4.12 e 4.15, é possível visualizar uma mesma tendência no acréscimo da viscosidade e da condutividade térmica das amostras exceto para as amostras NT03 e NT04 que, respectivamente, apresentaram resultados de condutividade térmica e viscosidade bastante diferentes da tendência apresentada pelas demais amostras.

Dos resultados, é óbvio que a natureza dos nanotubos de carbono utilizados no preparo das diferentes amostras, tem efeito significativo sobre as propriedades das mesmas. Assim, a amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, preparada a partir de nanotubos de carbono assim como produzidos, na forma de pó, apresentou os maiores incrementos, tanto na viscosidade quanto na condutividade térmica.

#### 4.5 Avaliação Termo-hidráulica

Alcançadas as condições necessárias para a realização dos ensaios, a operação do equipamento experimental, descrita anteriormente, é tal que o fluido de teste sai do reservatório-resfriador pela ação da bomba e é transportado, passando pelo medidor de vazão e seguindo até o trocador de calor de tubos concêntricos do pré-aquecedor, para ajuste da temperatura de entrada do fluido segundo a necessidade nominal do ensaio, seguindo para a entrada da seção de teste onde a temperatura entrada do fluido é registrada. A partir desse ponto o fluido escoa no interior do tubo, cuja parede é aquecida pela dissipação de corrente nas resistências aderidas à parede do mesmo na ST. Simultaneamente são registradas as temperaturas da parede, em diferentes posições axiais a partir da entrada da ST, a temperatura média do fluido na saída da

ST e a pressão do fluido em escoamento na entrada e na saída da ST e, de forma redundante, também são registrados os dados referentes a pressão diferencial do fluido em escoamento entre a entrada e a saída da ST. O fluido segue, então, para o reservatório-resfriador, onde rejeita o calor absorvido na ST, reiniciando o ciclo.

Foram realizados ensaios visando a transferência de calor e perda de carga com as diferentes amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Assim, no sentido de organizar os resultados e facilitar comparações e sua interpretação quanto ao comportamento termo-hidráulico das amostras, a análise será organizada, inicialmente, abordando a perda de carga e, posteriormente, a transferência de calor por convecção. Em ambas as análises a transferência de calor e a perda de carga serão apresentadas e discutidas em comparação com a água (fluido base). Além disso, serão apresentados resultados experimentais comparativos entre as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O produzidas, conforme anteriormente mencionado, a partir de nanopartículas de diferentes espécimes, características geométricas e em diferentes concentrações em massa de nanopartículas dispersas.

#### 4.5.1 Resultados Experimentais - Perda de Carga

A campanha de ensaios envolvendo escoamento de água permitiu o levantamento de, aproximadamente, 200 pontos experimentais, utilizando diferentes condições operacionais. Como os ensaios hidráulicos foram realizados simultaneamente com os ensaios térmicos, além das condições nominais de  $T_{ent}$ ,  $Q_{for}$  e  $\dot{m}$  (temperatura de entrada, potência fornecida e vazão mássica) a temperatura média do fluido em escoamento tem efeito significativo sobre a viscosidade do mesmo e, consequentemente, sobre a perda de carga avaliada. Os resultados para a água, apresentados no capítulo anterior (Cap. 3, Seção 3.3.1), incluindo comparações com as principais correlações para o coeficiente de atrito, comprovam a confiabilidade do equipamento experimental. Assim, a nova bateria de testes, conforme a Tabela 4.2, foi realizada e os resultados adquiridos serão utilizados para as devidas comparações da perda de carga e fator de atrito das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O.

É esperado que o efeito da adição de nanopartículas no fluido base incremente o coeficiente de transferência de calor por convecção em decorrência do acréscimo da condutividade

térmica. Em contrapartida, ocorre também um acréscimo na viscosidade e, consequentemente, um acréscimo na perda de carga. Nesse sentido, a avaliação da possível melhoria no desempenho energético de sistemas de transferência de calor resultante da aplicação de nanofluidos depende da relação entre o aumento da transferência de calor e o incremento da perda de carga, além de outros fatores inerentes a cada sistema.

A partir dos resultados experimentais levantados, é apresentado a seguir, a comparação dos mesmos, evidenciando a diferença na perda de carga do escoamento entre a água e sua versão nanofluídica, resultante da dispersão de NTCs.

### Comparação dos Resultados da Perda de Carga

Para os propósitos desse trabalho, isto é, a avaliação do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono à base de água, a estratégia consiste em comparar os resultados adquiridos a partir das campanhas de ensaio das amostras de nanofluido com os resultados medidos para o fluido base (água) nas mesmas condições. Desse modo, apresenta-se a seguir uma comparação entre os resultados dos testes realizados com as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O com aqueles levantados para a água.

A perda de carga é fator relevante para a escolha do fluido de trabalho a ser aplicado no sistema de transferência de calor. Assim, não se pretende com isso classificar este ou aquele fluido como melhor, pois cada aplicação exige critérios diferentes para esta finalidade.

As Figuras 4.16 a 4.20 ilustram a comparação dos resultados experimentais para a perda de carga das diferentes amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com a perda de carga do escoamento de H<sub>2</sub>O pela ST, obtidos durante as campanhas de ensaios realizados para levar a cabo a avaliação experimental do comportamento termo-hidráulico das amostras, conforme a Tabela 4.2.

Os resultados experimentais para a perda de pressão do escoamento do fluido entre a entrada e a saída da ST, medidos diretamente através do transdutor de pressão diferencial são apresentados em função da velocidade mássica,  $G$  [kg/s · m<sup>2</sup>], um dos parâmetros que mais afeta a perda de carga. A comparação é realizada de acordo com as condições nominais de temperatura de entrada,  $T_{ent_{NM}}$ , fluxo de calor pela parede do tubo da seção de teste,  $\dot{Q}_{for_{NM}}$ , e com vazões mássicas,  $\dot{m}_{NM}$ . A diferença entre a perda de carga do escoamento da versão nanofluídica e da

água (fluido base) é registrada no gráfico e o desvio médio relativo entre a perda de carga da água e da amostra de nanofluido foi calculado considerando as mesmas condições de ensaio.

Nas Figs. 4.16 a 4.20 também são apresentados os valores da perda de carga para a água destilada, calculados pela seguinte equação:

$$\Delta P = f \frac{8(\dot{m})^2}{\pi^2 \rho D^5} L, \quad (4.9)$$

onde o fator de atrito,  $f$ , é dado pela correlação de Petukhov;

$$f = (0,790 \ln(Re_D) - 1,64)^{-2}, \quad (3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6). \quad (4.10)$$

Importante ressaltar que, devido ao fato de que os testes térmicos e hidráulicos foram realizados simultaneamente, a linha de perda de carga representando os valores calculados pela correlação, restringe-se a uma única condição, isto é, ela ilustra os cálculos de  $\Delta P_{Petukhov}/L$ , para a condição nominal de temperatura de entrada,  $T_{ent} = 20^\circ C$ , fluxo de calor pela parede,  $\dot{Q}_{for} = 17 \text{ kW/m}^2$  e vazão mássica,  $\dot{m}$ , variando na faixa de 20 a 100  $\text{g/s}$ .

Durante a bateria de ensaios com a amostra NT01, foram realizados dois ensaios especiais, com vazões mássicas nominais de 25 e 95  $\text{g/s}$  para temperaruta de entrada de  $10^\circ C$  e fluxo específico de calor pela parede do tubo de  $10 \text{ kW/m}^2$ , com o objetivo de verificar as respostas do equipamento experimental frente a variação de tais parâmetros.

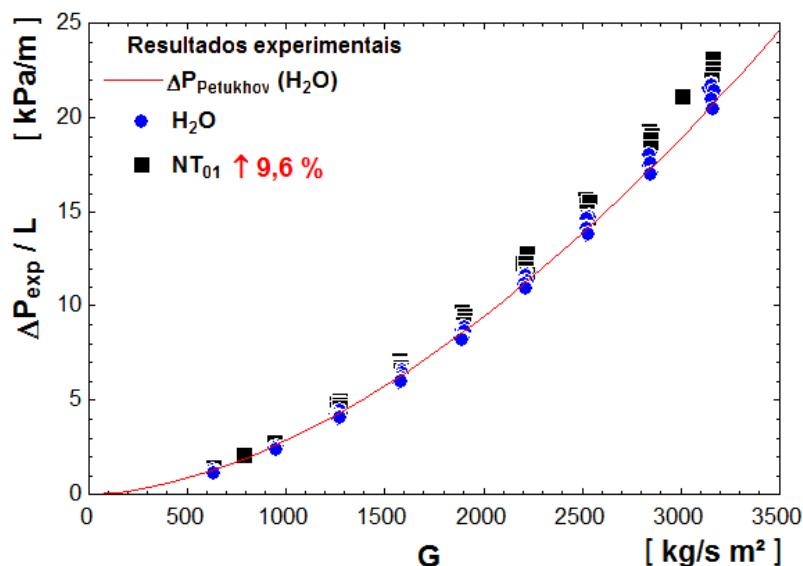


Figura 4.16 – Comparaçāo dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H<sub>2</sub>O - NT01.

A Figura 4.16 ilustra os resultados da medição da perda de carga por unidade de comprimento, em função da velocidade mássica, para o escoamento de  $H_2O$  e da amostra de nanofluido NT01, preparada a partir da diluição da solução concentrada de nanotubos de carbono de paredes multiplas em água (3 wt % Multi-walled Carbon Nanotubes in Water), com concentração volumétrica de 0,24 %. Observa-se que a amostra NT01 apresentou perda de carga, em média, 9,6 % acima do fluido base (água destilada) para as mesmas condições nominais de ensaio. Verifica-se também que, os resultados levantados para os dois pontos, resultantes dos ensaios especiais, seguem a mesma tendência.

A Figura 4.17 ilustra os resultados de  $\Delta P_{exp}/L \times G$  para o escoamento de  $H_2O$  e da amostra NT02.

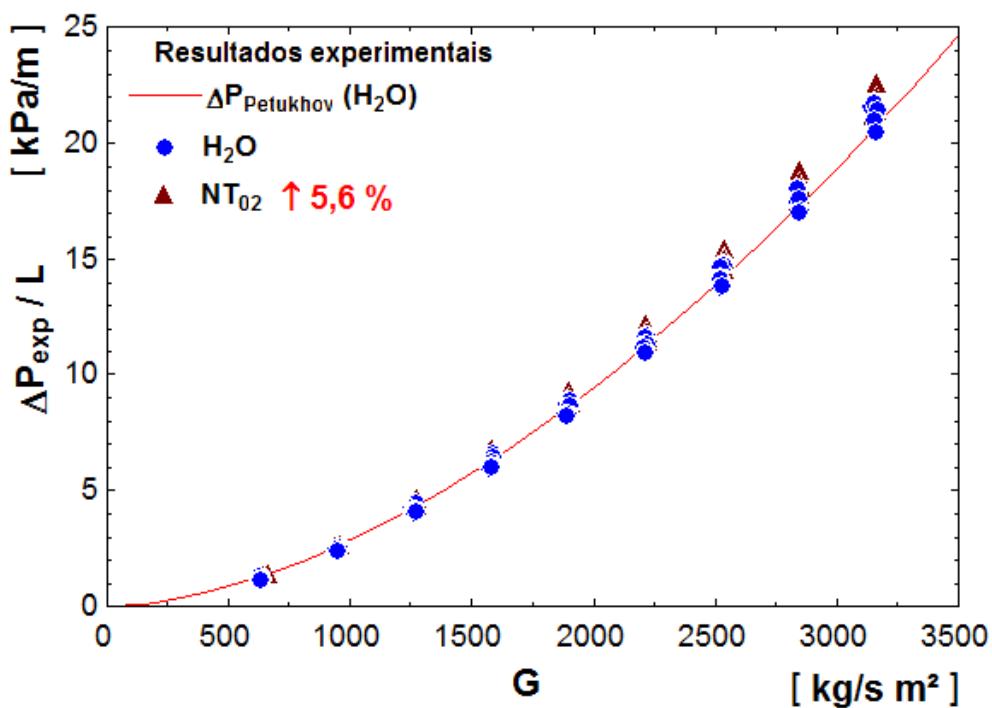


Figura 4.17 – Comparação dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times G$ ;  $H_2O$  - NT02.

Observa-se pela Figura 4.17 que a amostra de nanofluido de NTCs/ $H_2O$ , NT02, preparada a partir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), com fração em massa de nanotubos de 0,25 % (0,12 % vol.) apresentou perda de carga, em média, 5,6 % acima do fluido base para as mesmas condições nominais de ensaio. É interessante destacar que a medida da viscosidade da referida amostra resultou em um acréscimo de 8,6 % em relação à da água destilada.

A Figura 4.18 ilustra os resultados experimentais de  $\Delta P_{exp}/L$  levantados para o escoamento de  $\text{H}_2\text{O}$  e da amostra NT03.

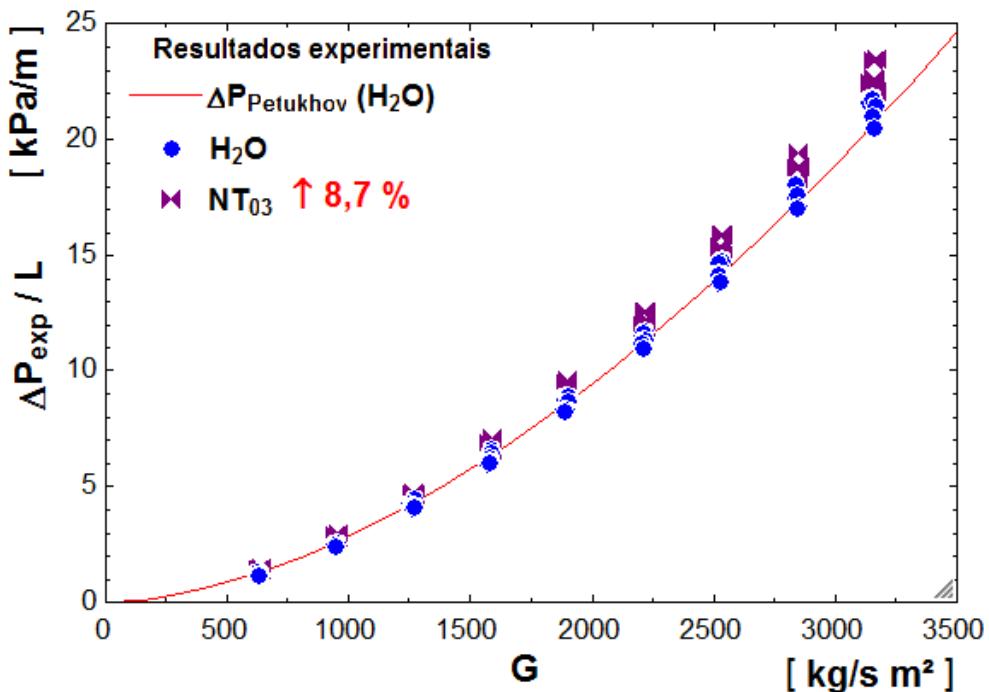


Figura 4.18 – Comparaçāo dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times G$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  - NT03.

Observa-se pela Figura 4.18 que a amostra de nanofluido de NTCs/ $\text{H}_2\text{O}$ , NT03, também preparada a partir de nanotubos de carbono funcionalizados, porém, com concentração volumétrica de 0,24 %, apresentou perda de carga, em média, 8,7 % acima do fluido base para as mesmas condições nominais de ensaio. Considerando-se os resultados experimentais levantados para a viscosidade da amostra NT03, cujo acréscimo em relação a viscosidade da água foi de 17,8 % o acréscimo encontrado para  $\Delta P_{exp}/L$ , em relação à água, parece refletir o efeito da dispersão de nanotubos sobre o incremento da viscosidade.

A Figura 4.19 ilustra os resultados de  $\Delta P_{exp}/L \times G$  para o escoamento de  $\text{H}_2\text{O}$  e da amostra de nanofluido NT04 para os ensaios realizados nas mesmas condições de temperatura de entrada e vazões mássicas.

Observa-se que a amostra de nanofluido de NTCs/ $\text{H}_2\text{O}$ , NT04, com concentração mísica de 0,24 %, também preparada a partir de nanotubos de carbono funcionalizados, apresentou perda de carga, em média, 8,6 % acima do fluido base para as mesmas condições nominais de ensaio. É interessante destacar que a medida da viscosidade da amostra NT04 resultou em um

acrédito de 11,6 % em relação à da água destilada conforme mostrado na Tabela 4.4.

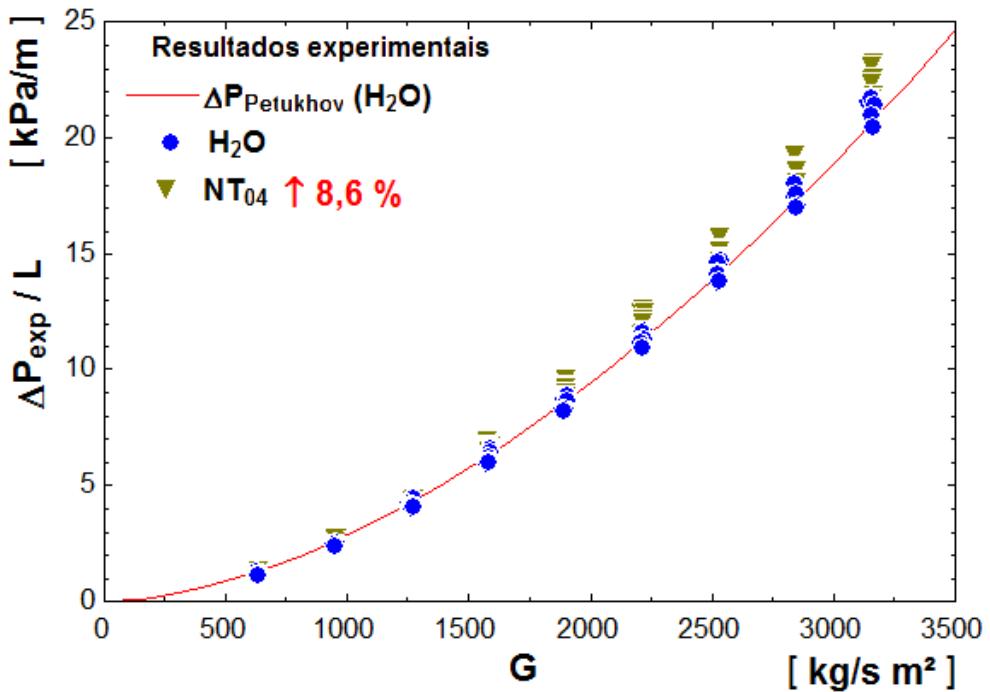


Figura 4.19 – Comparação dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times G$ ; H<sub>2</sub>O - NT04.

Os nanotubos utilizados para a preparação das amostras NT02, NT03 e NT04, são todos nanotubos funcionalizados (dispersíveis), mas a diferença básica entre eles está nas suas respectivas razões de aspecto  $r = L/d$ . Pela análise das Figs. 4.17, 4.18 e 4.19 é possível associar ao incremento da perda de carga com a fração em massa de nanopartículas. No entanto, vale ressaltar que a medida da viscosidade da amostra NT04 (Fig. 4.12) foi, em média, 6,2 % inferior à amostra NT03 e isso não se refletiu na medição da perda de pressão do escoamento das amostras.

A Figura 4.20 ilustra os resultados da medição da perda de carga em função da velocidade mássica,  $G$ , para o escoamento de H<sub>2</sub>O e da amostra de nanofluido NT05, para os ensaios realizados nas mesmas condições.

Os resultados experimentais para a amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT05, de acordo com a Fig. 4.20, indicam, um aumento médio de 8,6 % na perda de pressão em relação à água (fluído base). Observa-se que a referida amostra, preparada a partir de nanotubos de carbono assim como produzidos, na forma de pó, e, com concentração de 0,5 % em massa, apresentou perda de carga identica a da amostra NT04. No entanto, conforme os resultados

da medição da viscosidade (Tabela 4.4 / Fig. 4.12), o valor da mesma para a amostra NT05 é superior a da amostra NT04, em cerca de, 7,6 %. Como pode ser observado, esta diferença não se refletiu na medida da perda de pressão no escoamento das amostras. Em outras palavras, existem outros fatores que podem afetar a perda de carga.

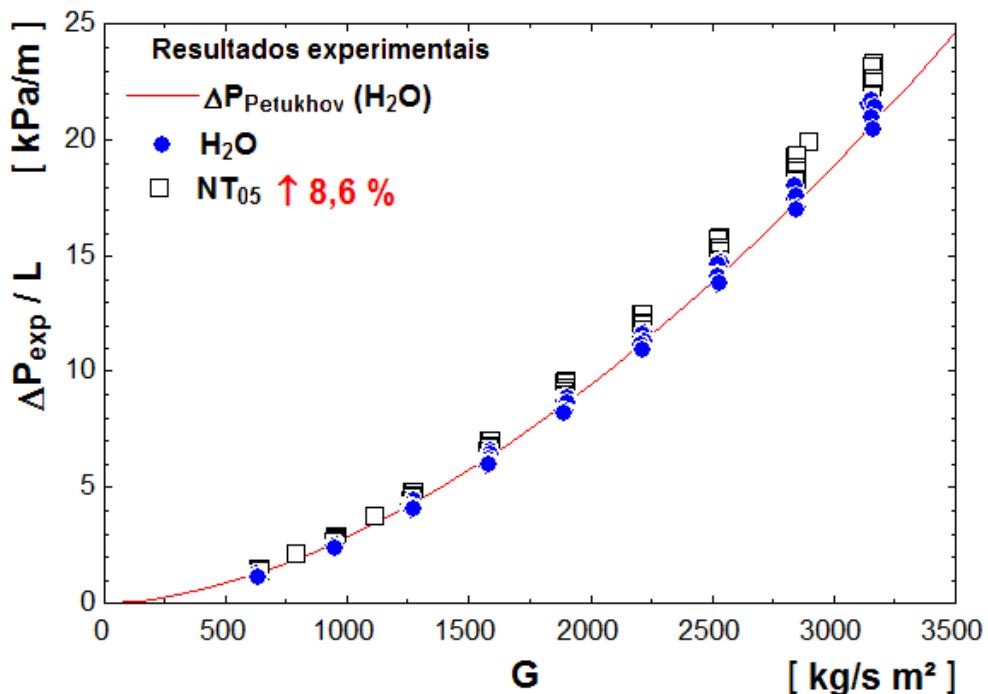


Figura 4.20 – Comparaçāo dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times G$ ;  $H_2O$  - NT05.

### Perda de carga em função do número de Reynolds

Devido ao fato de ainda não haver consenso quanto ao critério de comparação entre a perda de carga do nanofluido e de seu respectivo fluido base, os resultados mostrados nas Figs. 4.16 a 4.20 são apresentados a seguir, porém na forma  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ , onde  $Re$  foi determinado a partir das propriedades das amostras.

Na Figura 4.21 estão ilustrados os resultados experimentais de  $\Delta P_{exp}/L \times Re$  para o escoamento de  $H_2O$  e da amostra de nanofluido NT01 segundo as condições nominais de ensaio descritas na Tabela 4.2, isto é, estão, simultaneamente, apresentados os resultados para escoamento em diferentes vazões mássicas,  $\dot{m}_{NM}$  e fluxo específico de calor de 10, 14 e 18  $kW/m^2$  além das diferentes temperaturas de entrada de 10, 15 e 20 °C. Também aparece sobreposta a curva de perda de carga calculada a partir da correlação (Eqs. (4.9) e (4.10)), considerando

as propriedades da água na condição de ensaio de  $T_{ent} = 20^\circ C$ ,  $\dot{Q}_{for} = 18 kW/m^2$  e vazão mássica,  $\dot{m}$ , variando na faixa de 20 a 100  $g/s$ .

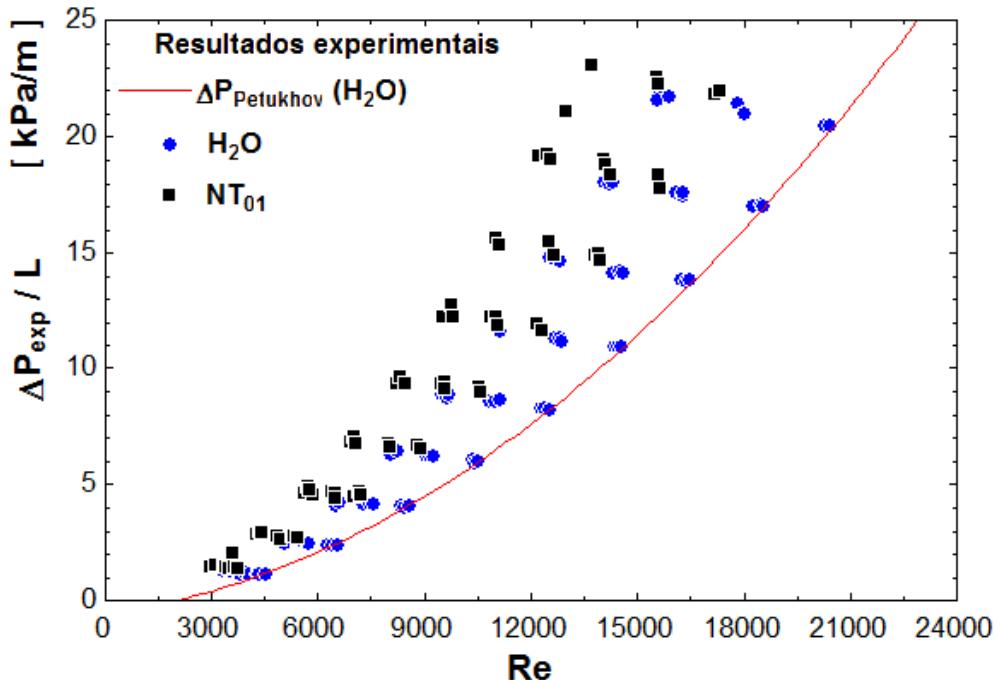


Figura 4.21 – Comparação dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ;  $H_2O$  - NT01.

Neste caso, observa-se a forte influência da temperatura média do fluido nas propriedades do mesmo, principalmente, na viscosidade, e, consequentemente, no número de Reynolds. Portanto, devem ser adotados alguns cuidados para proceder-se a comparação do desempenho termo-hidráulico dos diferentes fluidos. Na Fig. 4.21 é possível perceber o efeito da  $T_{ent}$  sobre a viscosidade e, consequentemente sobre o número de Reynolds. Entretanto, o efeito da variação da temperatura de entrada do fluido é visivelmente mais acentuado sobre a água do que sobre o nanofluido, isto é, para o caso específico dos ensaios realizados com temperatura de entrada de 10 e 20  $^\circ C$ , por exemplo, a variação do número de Reynolds da água destilada foi, em média 19 % maior que a da amostra NT01.

Na Figura 4.22 são ilustrados os resultados da medição da perda de carga em função do número de Reynolds,  $Re$ , para o escoamento de  $H_2O$  e das amostras de nanofluido NTCs/ $H_2O$ , NT02 e NT03.

É importante lembrar que ambas as amostras, NT02 e NT03, foram preparadas a partir de nanotubos de carbono funcionalizados, porém com fração em massa de nanotubos na suspensão de 0,25 % e 0,50 %, respectivamente. Além disso, conforme os resultados da medição

da viscosidade, a viscosidade da amostra NT03 foi encontrada para ser cerca de 10% superior a da amostra NT02, conforme os resultados apresentados na Tabela 4.4 e na Fig. 4.12.

O mesmo efeito detectado sobre o número de Reynolds da amostra NT01 (Fig. 4.21), em função da variação da temperatura de entrada, também é visto no caso das amostras NT02 e NT03, sendo que, neste caso, o efeito da variação da temperatura de entrada sobre o número de Reynolds do escoamento da água foi, em média 20% e 25% superior ao das amostras NT02 e NT03, respectivamente.

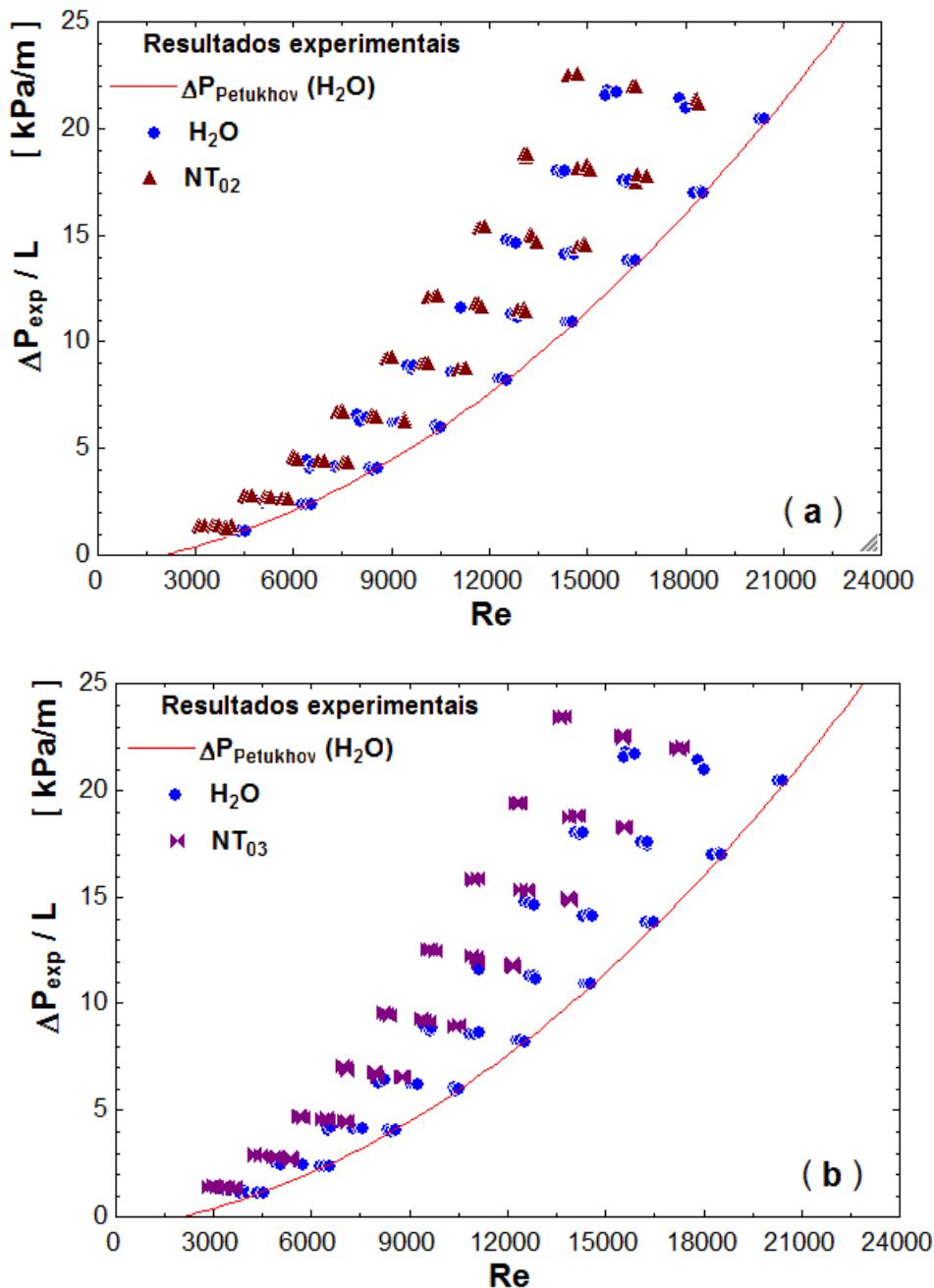


Figura 4.22 – Comparação dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; (a)  $H_2O$  -  $NT_{02}$ , (b)  $H_2O$  -  $NT_{03}$ .

A Figura 4.23 ilustra os resultados de  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ , para o escoamento de  $H_2O$  e das amostras de nanofluido NT04/H<sub>2</sub>O, NT04 e NT05.

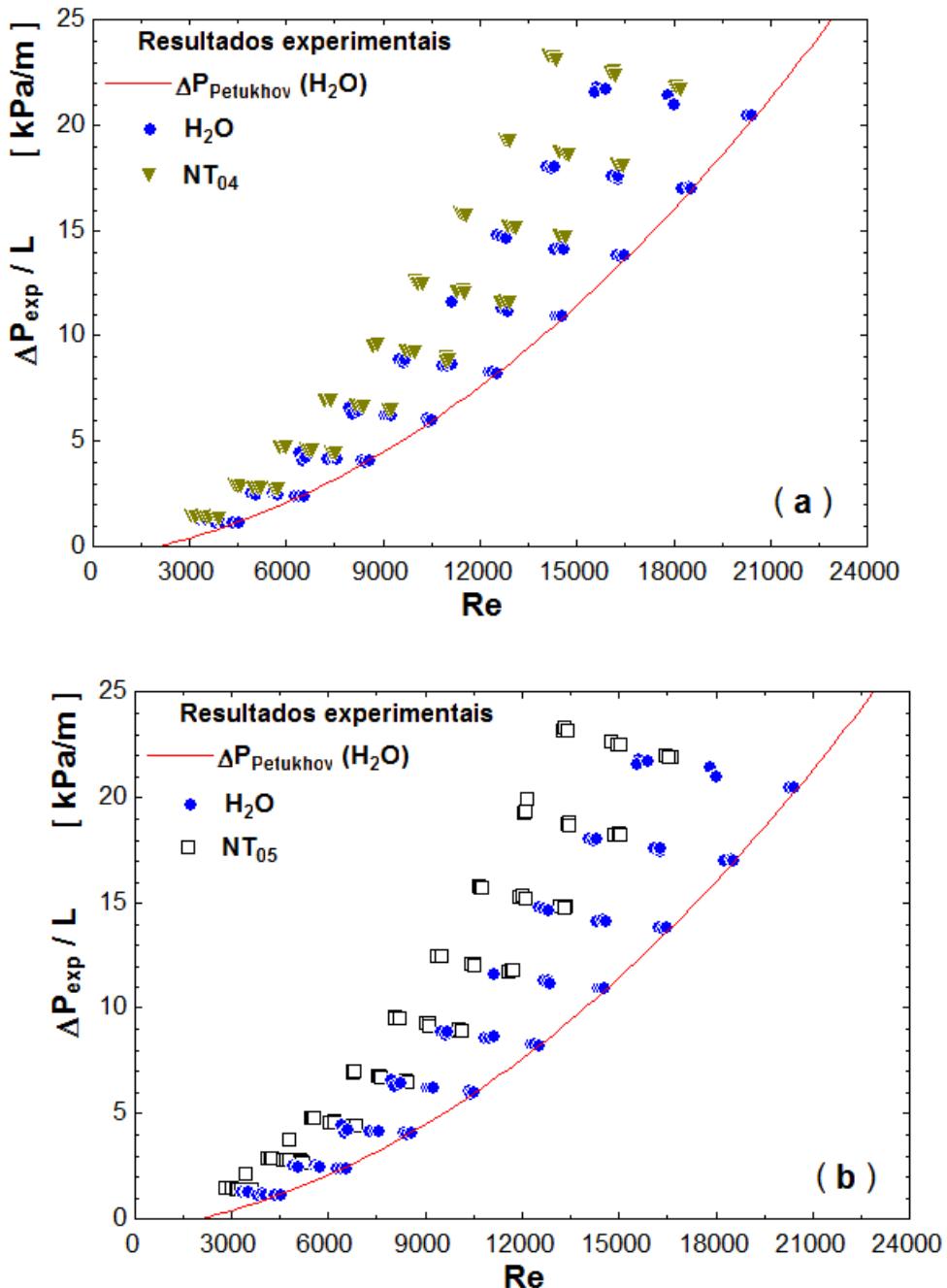


Figura 4.23 – Comparação dos resultados experimentais  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ; (a)  $H_2O$  -  $NT_{04}$ , (b)  $H_2O$  -  $NT_{05}$ .

Vale lembrar que a amostra NT05 foi preparada pela dispersão de nanotubos de carbono na forma de pó e assim como produzidos e, como mostrado na Fig. 4.4, a referida amostra apresentou instabilidade e além disso, conforme os resultados da medição experimental da viscosidade (Tabela 4.4), a amostra em questão foi a que proporcionou maior incremento na viscosidade,

sendo em média 19,2% superior à da água destilada. Entretanto, a amostra NT04, apresentou viscosidade, em média, 11,6% superior a da água destilada. Assim, o efeito da incremento da viscosidade sobre o número de Reynolds pode ser observado na Fig. 4.23.

Como pode ser observado nas figuras 4.21 a 4.23, a versão nanofluídica da água, obtida pela dispersão de nanotubos de carbono tem, para uma mesma vazão mássica, um número de Reynolds que é, em média 13,1% menor. Assim, para a avaliação do aumento da perda de carga no escoamento da versão nanofluídica, resultante da dispersão de nanopartículas, em termos do número de Reynolds, é necessário considerar o efeito das mudanças nas propriedades da suspensão. Neste trabalho, o parâmetro de entrada utilizado foi a vazão mássica  $\dot{m}$  (medido diretamente na linha de fluxo), no entanto, sem considerar quaisquer variações na potência de bombeamento necessária para efetivamente atingir tal vazão. É importante lembrar, ainda, que a versão nanofluídica (solução concentrada de nanotubos de carbono de paredes múltiplas), adquirida diretamente do fornecedor, possui surfactante como agente estabilizante. Entretanto, não foi fornecida nenhuma informação sobre o mesmo para que se tentasse levantar suas propriedades e também realizar ensaios com fluido base (somente  $\text{H}_2\text{O} + \text{surfactante}$ ).

### Efeito da concentração de nanoparticulas sobre a perda de carga

A fração em massa ou em volume de nanopartículas na suspensão é um dos parâmetros que afeta diretamente as propriedades dos nanofluidos. Para avaliar o efeito da concentração de nanopartículas foram produzidas as amostras de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de água NT02 e NT04 com concentração em massa de nanoparticulas,  $\phi = 0,25\%$  e  $\phi = 0,50\%$ , e, preparadas a partir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall).

A Figura 4.24 ilustra o efeito da concentração em massa de nanotubos de carbono em dispersão na água sobre a perda de carga por unidade de comprimento,  $\Delta P_{exp}/L$ , através da comparação dos resultados experimentais levantados para as amostras, NT02 e NT04, segundo as mesmas condições nominais de ensaio.

Os resultados mostrados na Fig. 4.24 indicam uma diferença média de apenas 3,1% entre a perda de carga por unidade de comprimento medida para o escoamento das amostras de nanofluidos de NTCs/ $\text{H}_2\text{O}$ , NT02 e NT04. Naturalmente, o resultado da medição da queda de pressão por unidade de comprimento da amostra NT04, com maior concentração em massa de

nanotubos de carbono, foi maior, e, ao que parece, este resultado está diretamente associado à diferença medida na viscosidade das respectivas amostras (Tabela 4.4).

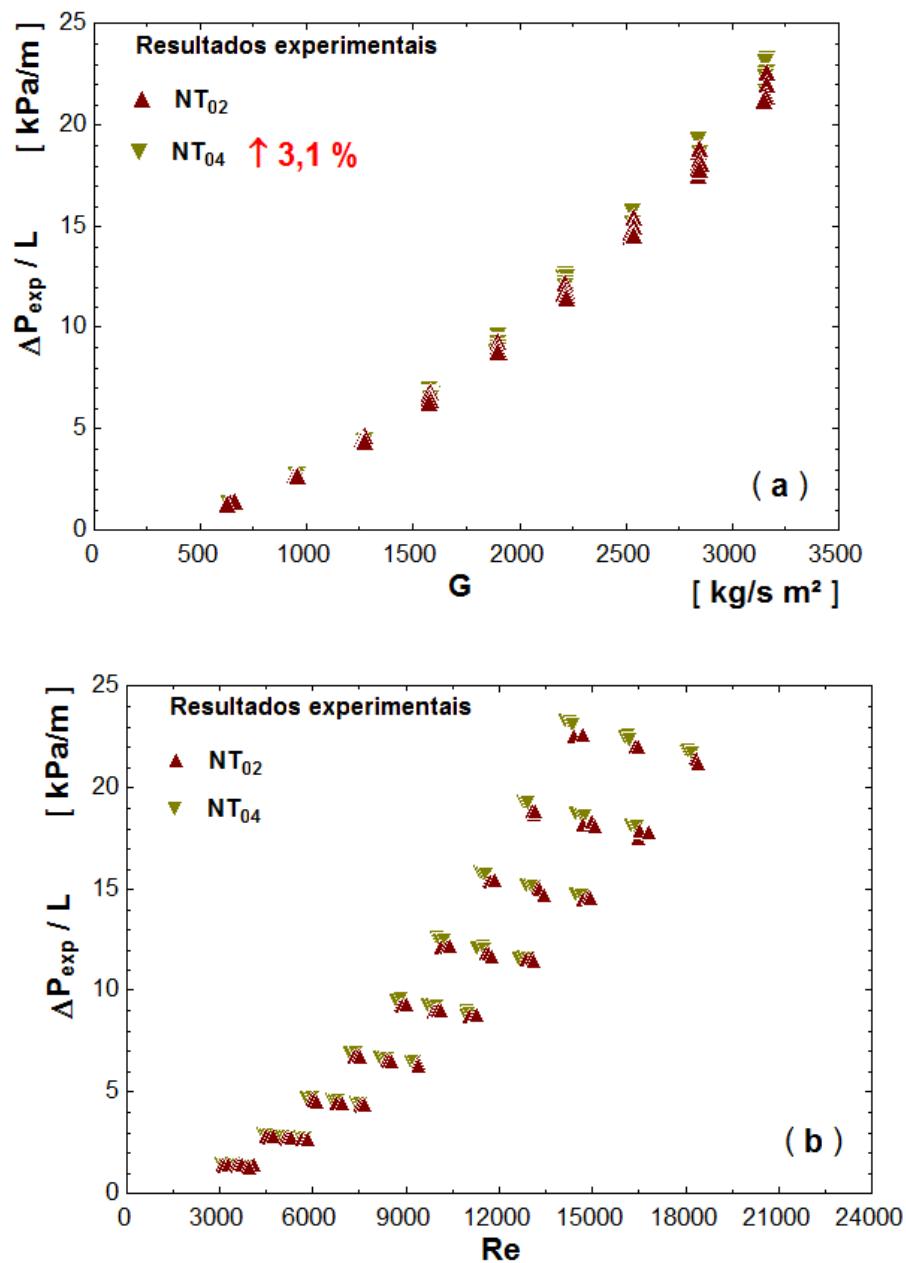


Figura 4.24 – Efeito da fração em massa de nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT02 e NT04; (a)  $\Delta P_{exp}/L \times G$  e (b)  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ;

#### Efeito da razão de aspecto dos nanotubos sobre a perda de carga

Especialmente para nanopartículas de elevada razão de aspecto, como é o caso dos nanotubos de carbono, a forma das nanopartículas, além de afetar diretamente características como a área superficial específica das nanopartículas, o formato de tubo ou fio pode alterar as

características finais do nanofluido devido a formação de emaranhados e aglomerados quando dispersa em líquidos. Para avaliar o efeito da razão de aspecto, sobre a perda de carga do escoamento foram produzidas as amostras NT03 e NT04, ambas com concentração em massa,  $\phi = 0,50\%$ , e preparadas apartir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), com razão de aspecto,  $r = L/d$ , de 100 e 2400, respectivamente.

A Figura 4.25 ilustra o efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono em dispersão na água sobre a perda de carga por unidade de comprimento,  $\Delta P_{exp}/L$ .

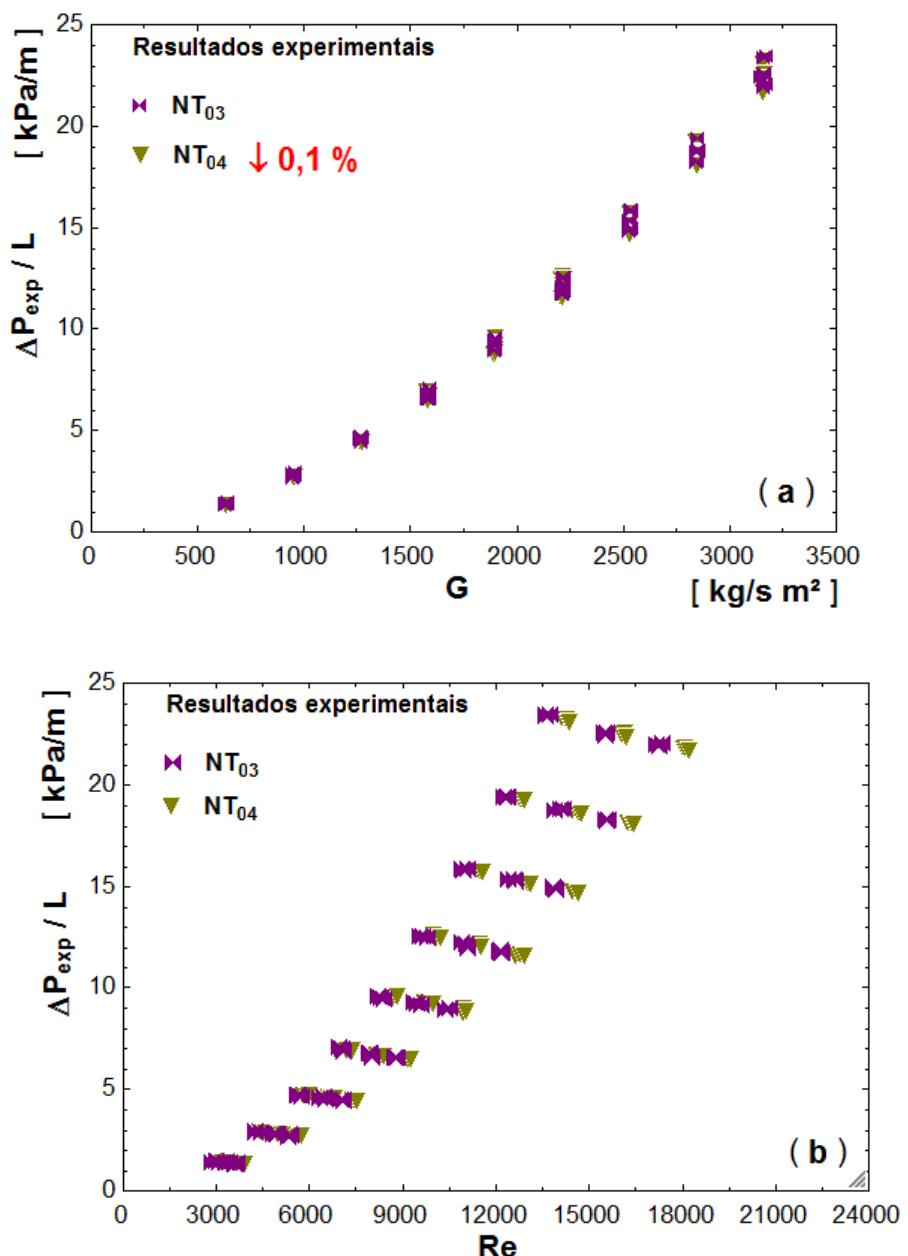


Figura 4.25 – Efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT03 e NT04; (a)  $\Delta P_{exp}/L \times G$  e (b)  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ;

Os resultados experimentais da queda de pressão por unidade de comprimento mostrados na Figura 4.25 indicam que a perda de carga de ambas as amostras, NT03 e NT04, foi praticamente a mesma, não sendo possível concluir claramente sobre o efeito da razão de aspecto dos nanotubos dispersos sobre a perda de carga no escoamento das amostras. No entanto, segundo os resultados experimentais levantados para a viscosidade, a amostra NT04 apresentou viscosidade, em média, 6,2 % menor que a da amostra NT03 e, isso também não se refletiu nos resultados levantados para a perda de carga.

### **Efeito da natureza dos nanotubos sobre a perda de carga**

Atualmente existem diferentes métodos e técnicas de síntese de nanopartículas, não sendo diferente no caso da produção de nanotubos de carbono. Obviamente, além das dimensões, do número de paredes e da quiralidade dos nanotubos de carbono, muitas outras características dos nanotubos de carbono dependem do processo empregado na síntese dos mesmos. Devido às condições da produção dos nanotubos de carbono, para a oferta final do produto, ainda se exige a purificação e posterior caracterização dimensional dos nanotubos produzidos. Além disso, devido à escala de grandeza do objeto, a caracterização dimensional é realizada estatisticamente e, por sua vez, a purificação envolve diferentes técnicas, algumas, inclusive com lavagem ácida. Naturalmente, em escala nanométrica, tantas variáveis implicam em um produto bastante heterogêneo. Seguidamente a isso, dependendo da aplicação requerida, os nanotubos podem ser funcionalizados para atender a determinadas características, tais como a dispersibilidade em água para a preparação de nanofluidos. No entanto, comercialmente, os nanotubos de carbono são especificados somente por seu número de paredes, diâmetro e comprimento. Tal variedade de natureza, tamanho, forma e pureza das nanopartículas empregadas na preparação de nanofluidos tem sido apontada como uma possível responsável pela grande dispersão nos resultados experimentais levantados por diferentes grupos de pesquisa. Em atenção a isso, como mostrado na Tabela 4.1, neste trabalho foram empregados nanotubos de carbono de natureza bastante diversificada e de várias características geométricas, com o objetivo de levantar um banco de dados experimentais com variações significativas nos parâmetros, para avaliar o comportamento termo-hidráulico das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O.

As amostras NT01, NT04 e NT05, com mesma concentração em massa de nanotubos

de carbono, foram produzidas, respectivamente, a partir de uma solução aquosa concentrada de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (3 wt % Multi-walled Carbon Nanotubes in Water), de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), facilmente dispersíveis e de nanotubos de paredes múltiplas, na forma de pó, assim como produzidos (Multi-walled Carbon Nanotubes in Water).

A Figura 4.26 ilustra a comparação dos resultados experimentais levantados para a perda de carga por unidade de comprimento do escoamento das amostras NT01, NT04 e NT05.

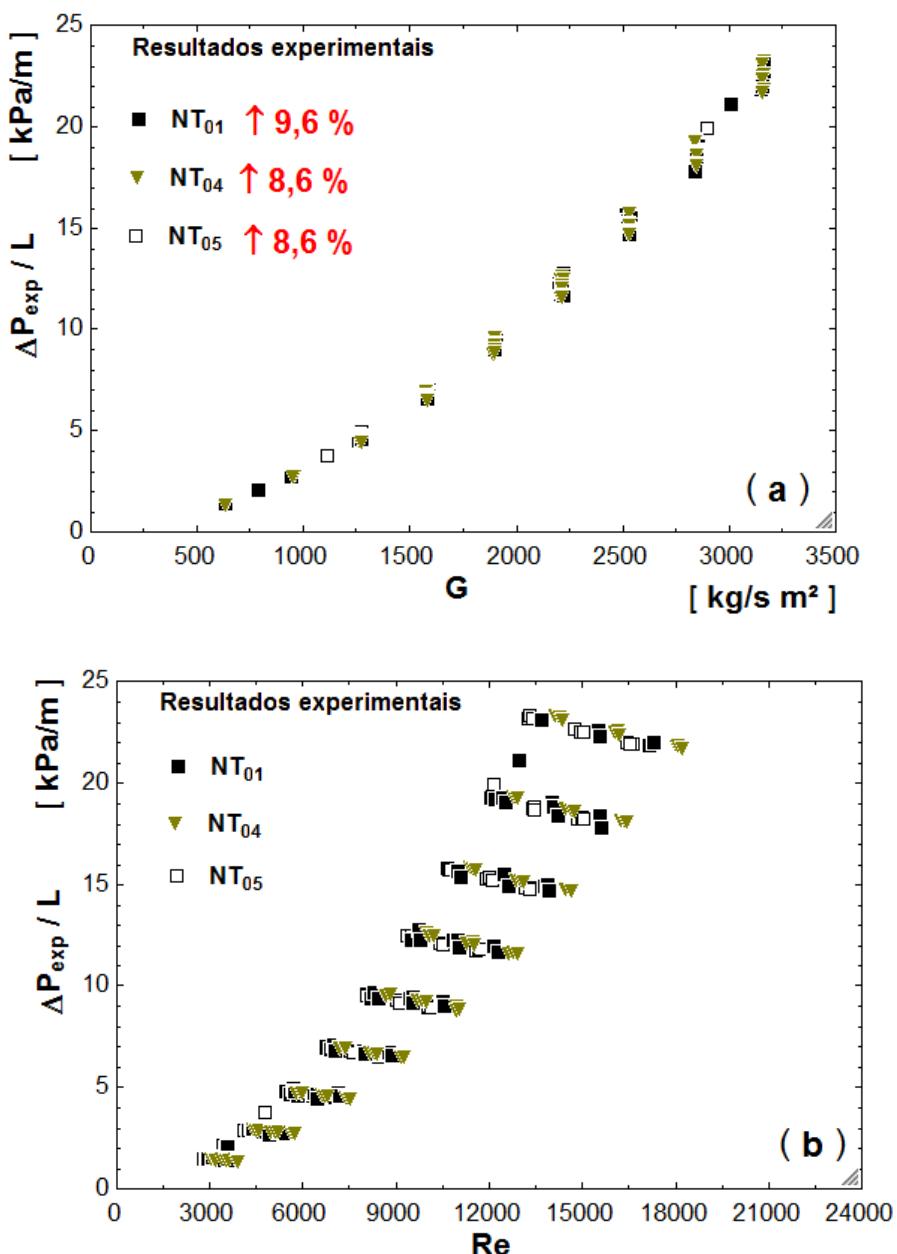


Figura 4.26 – Efeito do espécime de nanotubos de carbono utilizado na preparação da dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT01, NT04 e NT05; (a)  $\Delta P_{exp}/L \times G$  e (b)  $\Delta P_{exp}/L \times Re$ ;

O resultados experimentais levantados para  $\Delta P_{exp}/L$  indicam um aumento médio, em relação á água, de 9,6 %, 8,6 % e 8,6 % para as amostras NT01, NT04 e NT05, respectivamente. Nessas condições, como todas as amostras têm a mesma concentração em massa,  $\phi = 0,50\%$ , não é possível apontar o efeito da natureza dos nanotubos sobre a perda de carga por unidade de comprimento no escoamento das amostras. Cabe ressaltar, que os resultados experimentais levantados para a viscosidade indicam uma diferença média de 16,7 %, 11,6 % e 19,2 % na viscosidade das amostras NT01, NT04 e NT05, em relação a da água, respectivamente. No entanto, esta diferença na viscosidade parece não afetar os resultados experimentais medidos durante o escoamento das amostras. O que parece evidente é que, como a amostra NT01 possui surfactante em sua composição, a mesma apresenta maior perda de carga, como seria de esperar.

#### 4.5.2 Resultados Experimentais - Transferência de Calor

Fatores tais como a técnica de preparação das dispersões (nanofluidos), o tipo, tamanho e forma das nanopartículas empregadas, o uso ou não de surfactantes para garantir a estabilidade e homogeneidade das suspensões e etc. influenciam sobremaneira os resultados sobre o comportamento da transferência de calor em nanofluidos. Em atenção a isso, durante o desenvolvimento do presente trabalho, foram preparadas diferentes amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com vistas a avaliar o comportamento da transferência de calor por convecção forçada em escoamento turbulento no interior de um tubo circular reto e horizontal sob a condição de contorno de fluxo específico de calor constante e uniforme pela parede.

Os resultados experimentais levantados na campanha de ensaios, conforme a Tabela 4.2, serão utilizados para a avaliação do comportamento da transferência de calor por convecção forçada do escoamento das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. A tal avaliação, conforme a proposta inicial deste trabalho, consiste na comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção, experimentalmente determinado, das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O e do fluido base (água).

Assim, o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ , empregado na comparação, é aquele experimentalmente obtido por intermédio da lei de resfriamento de Newton, como segue:

$$h = \frac{\dot{Q}_{for}}{TP_{(x)} - Tm_{(x)}}, \quad (4.11)$$

Conforme apresentado no capítulo anterior (Seção 3.3), os testes com água destilada e com outros fluidos credenciam o equipamento experimental para esta análise. Baseado nos resultados encontrados para a água e a comparação dos mesmos com os resultados previstos pelas correlações amplamente aceitas, o fluxo de calor constante e uniforme pela parede do tubo da ST,  $\dot{Q}_{for}$ , é obtido fazendo-se uma correção de 3% no valor da potência dissipada nas resistências flexíveis aderidas a parede do tubo da ST, com a finalidade de corrigir a fuga de calor por falhas no isolamento, conforme as medições prévias.

O coeficiente de transferência de calor é fator determinante para o projeto de sistemas de transferência de calor e, considerando que os nanofluidos estão sendo apontados como uma nova classe de fluido de transferência de calor, o presente trabalho se insere nesse esforço na tentativa de suprir as informações sobre o coeficiente de transferência de calor por convecção da água e sua versão nanofluídica, resultante da dispersão de NTCs.

### Comparação dos Resultados da Transferência de Calor

Para os propósitos desse trabalho a estratégia consiste em comparar os resultados adquiridos a partir das campanhas de ensaio das amostras de nanofluido com os resultados medidos para o fluido base (água) nas mesmas condições. Desse modo, será apresentada, a seguir, a comparação entre os resultados experimentais levantados durante a campanha de ensaios, realizados com as amostras de nanofluidos de NTCs/ $H_2O$  com os resultados obtidos para a água.

Os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor,  $h_{exp}$ , são determinados através da Eq. (4.11) e são apresentados em função da velocidade mássica,  $G$  [ $kg/s \cdot m^2$ ], que é um dos parâmetros que mais afeta o coeficiente de transferência de calor. A comparação é realizada de acordo com as condições nominais de temperatura de entrada, fluxo de calor pela parede do tubo da seção de teste e vazão mássica. A diferença entre o coeficiente de transferência de calor da versão nanofluídica e da água (fluido base) é ilustrada no gráfico e o desvio médio relativo entre o coeficiente de transferência de calor dos fluidos também é anotado.

É importante ressaltar que, devido ao fato de os testes terem sido realizados em diferentes temperaturas de entrada, a curva do coeficiente de transferência de calor representando

os valores calculados pela correlação,  $h_{Gnielinski}$ , restringe-se a uma única condição, isto é, ela ilustra os cálculos de  $h$ , para a condição nominal,  $T_{ent} = 20^\circ C$ ,  $\dot{Q}_{for} = 17 kW/m^2$  e  $\dot{m}$ , variando na faixa de 20 a 100  $g/s$ .

Os resultados do coeficiente de transferência de calor são obtidos através da medição da potência fornecida as resistências elétricas, cujo valor foi corrigido, isto é,

$$Q_{exp} = 0,97 \dot{Q}_{for} \quad (W) \quad (4.12)$$

e assim, determinando-se

$$\dot{Q}_{for} = Q_{exp}/A_{ST} \quad (kW/m^2) \quad (4.13)$$

Durantes os ensaios são registrados os dados de temperatura média do fluido na entrada e na saída da ST, ( $T_{ent}$  e  $T_{sai}$ ). Assim, uma hipótese bastante razoável é considerar como sendo linear a variação da temperatura média do fluido ao longo da ST, temos:

$$Tm_{(x)} = \left( \frac{T_{sai} - T_{ent}}{L_{ST}} \right) x + T_{ent} \quad (4.14)$$

Por sua vez, a temperatura da parede do tubo da ST na posição  $x$ ,  $TP_{(x)}$ , é medida por intermédio dos termopares fixados nas diferentes posições axiais,  $x$ , a partir da entrada da seção de teste.

A Figura 4.27 ilustra os resultados experimentais para o coeficiente de transferência de calor,  $h_{exp}$  [ $kW/m^2 \cdot ^\circ C$ ] em função da velocidade mássica,  $G$  [ $kg/s \cdot m^2$ ] (Fig. 4.27(a)) e em função do número de Reynolds,  $Re$  (Fig. 4.27(b)), da  $H_2O$  e da amostra de nanofluido NT01 em escoamento na ST sob as mesmas condições nominais de ensaio.

Observa-se pela Figura 4.27(a) que a amostra de nanofluido de  $NTCs/H_2O$ , NT01, preparada a partir da diluição da solução concentrada de nanotubos de carbono de paredes multiplas em água (3  $wt\%$  Multi-walled Carbon Nanotubes in Water), com concentração de 0,5% apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 13,7% acima do fluido base (água) para as mesmas condições nominais de ensaio.

Verifica-se também que, os resultados levantados para os dois pontos, resultantes dos ensaios especiais ( $\dot{m}_{NM} = 25 g/s$  e  $\dot{m}_{NM} = 95 g/s$ ), seguem a mesma tendência dos resultados

dos ensaios cujos parâmetros estão descritos na Tabela 4.2. Além disso, quando apresentado em função de  $Re$ , o coeficiente de transferência de calor  $h$  da amostra de nanofluido assume valores ainda mais elevados em relação ao coeficiente de transferência de calor da água (Fig. 4.27(b)).

É importante registrar que a condutividade térmica, experimentalmente obtida, da amostra NT01 foi, em média, 37,7 % superior à do fluido base (água).

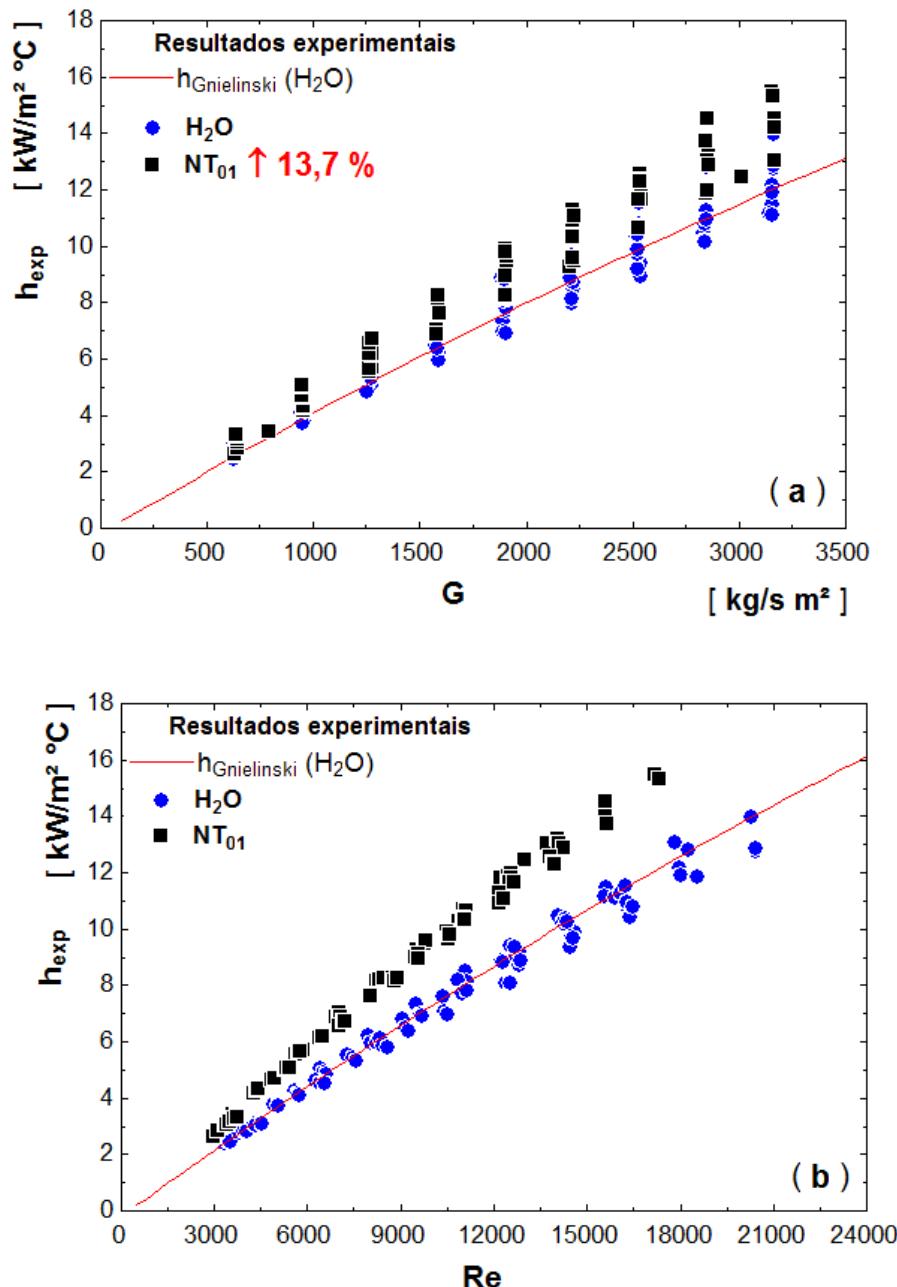


Figura 4.27 – Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT01 e  $H_2O$ ; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

A Figura 4.28 ilustra os resultados experimentais para  $h_{exp}$  em função da velocidade mássica,  $G$  (Fig. 4.28(a)), e em função do número de Reynolds,  $Re$  (Fig. 4.28 (b)) da  $H_2O$  e

da amostra de nanofluido NT02 em escoamento na ST sob as mesmas condições nominais de ensaio.

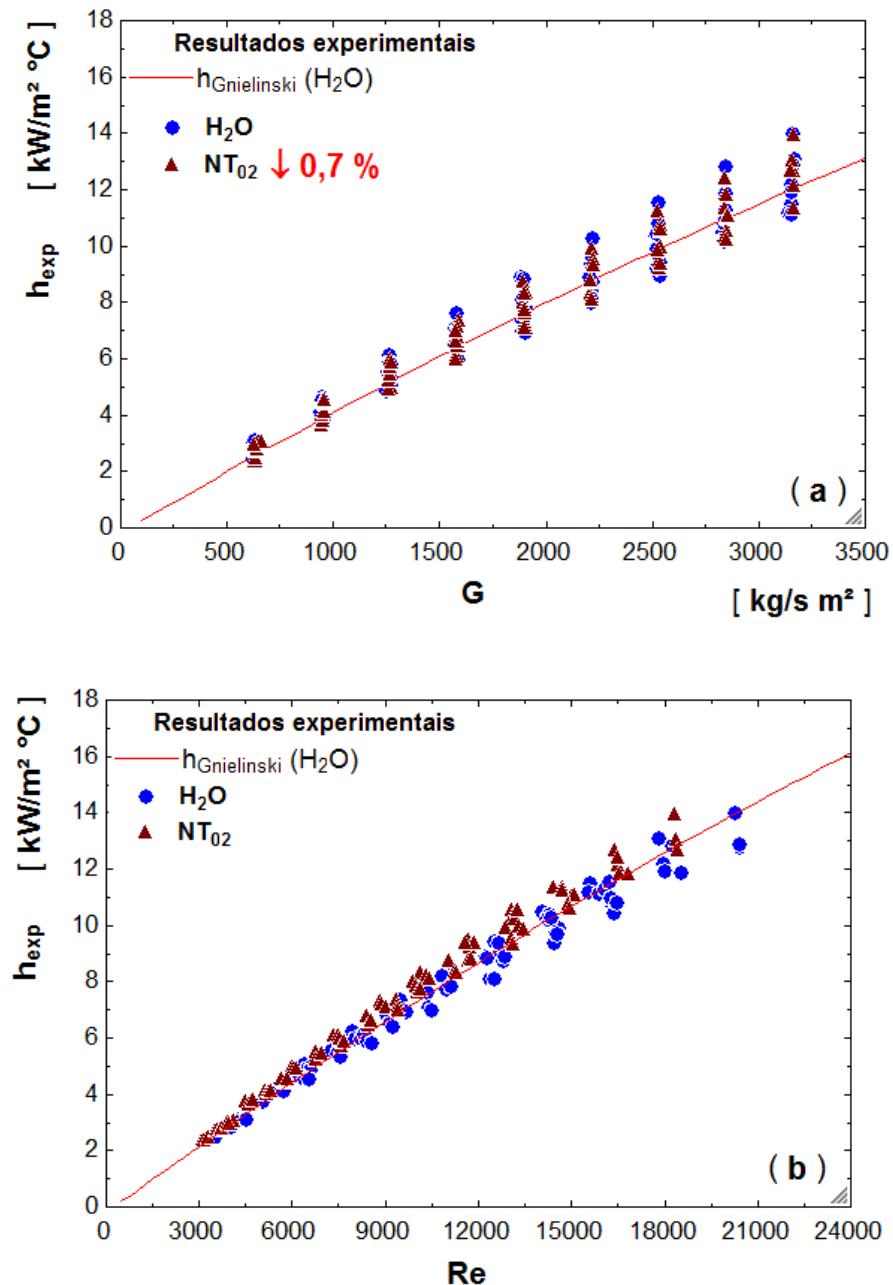


Figura 4.28 – Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT02 e  $\text{H}_2\text{O}$ ; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

Observa-se pela Figura 4.28 (a) que a amostra NT02, preparada a partir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), com concentração de 0,25 % apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 0,7 % abaixo do coeficiente de transferência de calor do fluido base (água destilada) para as mesmas condições nominais de ensaio. No entanto, observa-se na Fig. 4.28 (b), com o coeficiente de transferência de calor apresentado em função

do número de Reynolds,  $Re$ , que o coeficiente de transferência de calor da amostra NT02 é *ligeiramente* superior ao da água, muito embora, essa diferença não possa ser quantificada uma vez que o parâmetro experimental de ensaio adotado é a vazão mássica  $\dot{m}$ .

A Figura 4.29 ilustra os resultados experimentais para  $h_{exp}$  em função da velocidade mássica,  $G$  (Fig. 4.29 (a)), e  $Re$  (Fig. 4.29 (b)) da  $H_2O$  e da amostra de nanofluido NT03 em escoamento na ST sob as mesmas condições nominais de ensaio.

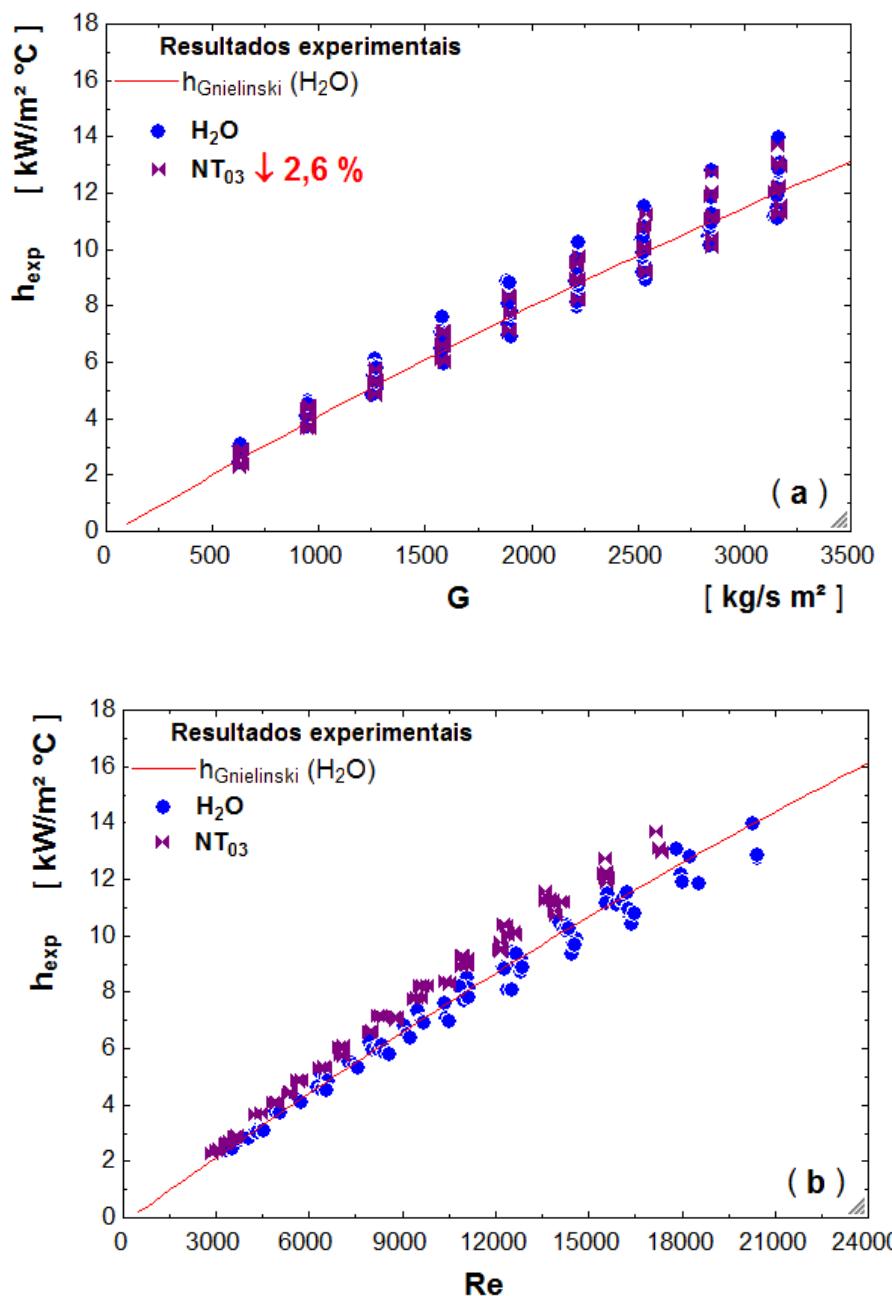


Figura 4.29 – Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT03 e  $H_2O$ ; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

Na Figura 4.29 (a) é possível observar que a amostra, NT03, apresentou coeficiente

de transferência de calor, em média, 2,6% abaixo do coeficiente de transferência de calor do fluido base. No entanto, quando expresso em função do número de Reynolds, o coeficiente de transferência de calor da amostra NT03 é superior ao da água, muito embora, essa diferença não possa ser quantificada, como mencionado anteriormente.

A Figura 4.30 ilustra os resultados experimentais levantados para a amostra NT04.

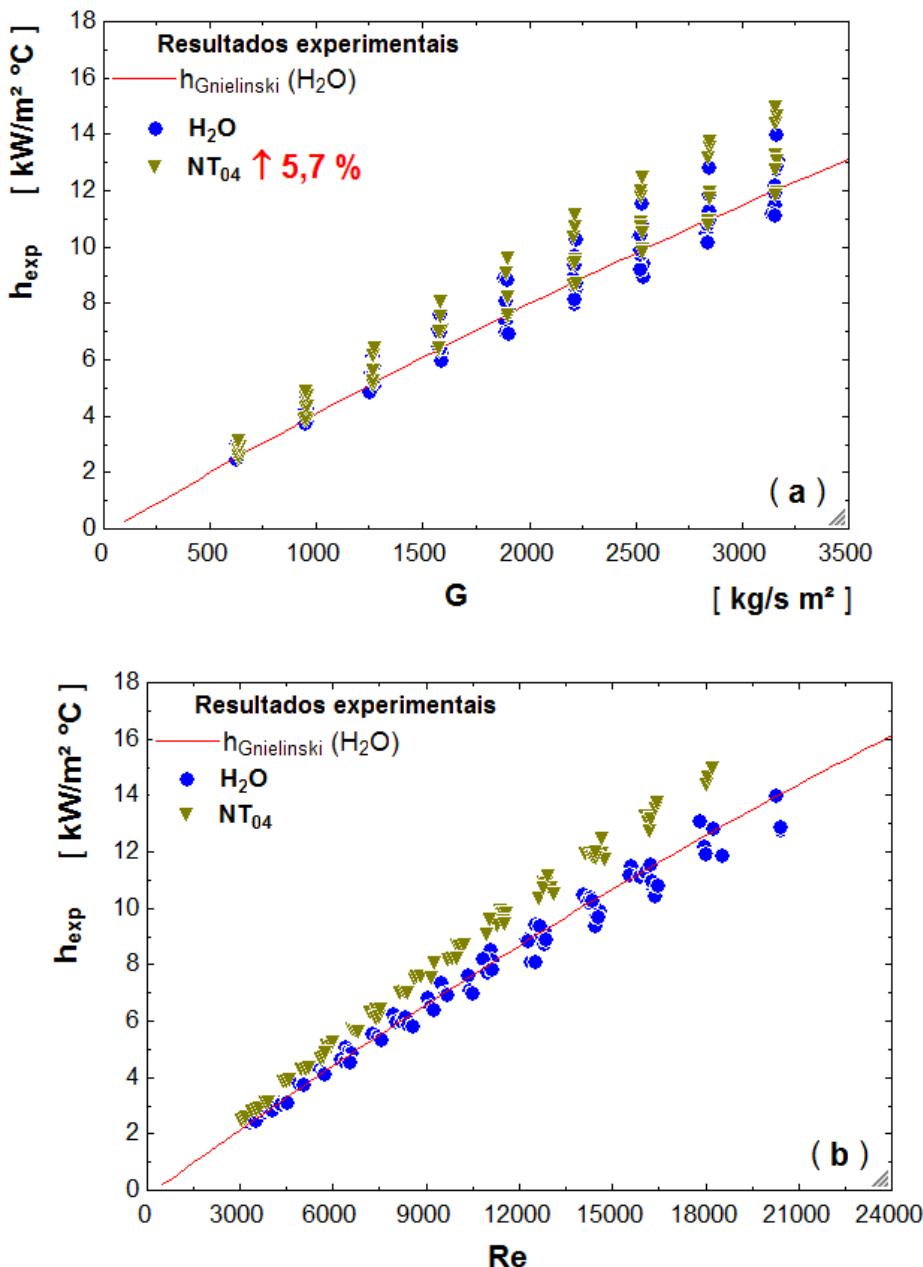


Figura 4.30 – Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT04 e  $\text{H}_2\text{O}$ ; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

De acordo com a Figura 4.30 (a) a amostra de nanofluido de NTCs/ $\text{H}_2\text{O}$ , NT04, preparada a partir de nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), com con-

centração de 0,5% apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 5,7% acima do coeficiente de transferência de calor do fluido base (água) para medições realizadas nas mesmas condições nominais de ensaio. Na Fig. 4.30 (b), onde o coeficiente de transferência de calor é apresentado em função do número de Reynolds,  $Re$ , o coeficiente de transferência de calor da amostra NT04 é superior ao da água. Observa-se, no entanto que, o número de Reynolds calculado a partir das propriedades termofísicas da amostra (calculadas ou medidas conforme descrito anteriormente (Seção 4.4)) é, em média, 10,4% inferior ao da água para os ensaios realizados nas mesmas condições nominais.

É importante ressaltar, ainda, que conforme os resultados experimentais levantados para a condutividade térmica da amostra NT04, a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O (amostra NT04), é, em média, 17,0% superior a da água. Isso considerado, o incremento no coeficiente de transferência de calor, justifica-se como o efeito da dispersão dos nanotubos de carbono na água. Entretanto, as amostras NT03 e NT04, ambas preparadas com nanotubos de carbono funcionalizados e com a mesma fração em massa de nanotubos na suspensão, apresentaram resultados, significativamente, diferentes. Como pode ser visto pelo desvio médio de  $h_{exp}$  em relação a água anotados nas Figs. 4.29 (a) e 4.30 (a) tal diferença pode ser atribuída à diferenças nas características finais das suspensões, tais como, a formação de aglomerados de partículas, por exemplo.

Finalmente, a Figura 4.31 ilustra os resultados experimentais para  $h_{exp}$  em função da velocidade mássica,  $G$  (Fig. 4.31 (a)) e  $Re$  (Fig. 4.31 (b)), da H<sub>2</sub>O e da amostra de nanofluido NT05 em escoamento na ST sob as mesmas condições nominais de ensaio.

A amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT05, produzida pela dispersão de 0,5% em massa de nanotubos de carbono na forma de pó (Multi-walled Carbon Nanotubes), através de sonicação seguida de homogenização por alta pressão, apresentou coeficiente de transferência de calor, em média, 17,5% acima do coeficiente de transferência de calor do fluido base (água) para medições realizadas nas mesmas condições nominais de ensaio (Fig. 4.31 (a)).

O incremento no coeficiente de transferência de calor da versão nanofluidica da água também pode ser visto na Fig. 4.31 (b), onde o coeficiente de transferência de calor é apresentado em função do número de Reynolds,  $Re$ .

Devido ao fato de que os ensaios foram realizados adotando-se a vazão mássica  $\dot{m}$  como

parâmetro a diferença entre coeficiente de transferência de calor da amostra NT05 e o coeficiente de transferência de calor da água não foi quantificada para  $h_{exp} \times Re$ . Porém, empregando-se as propriedades termofísicas calculadas ou medidas conforme descrito na Seção 4.4, o número de Reynolds da amostra NT05 é, em média, 17,5 % inferior ao da água para as mesmas condições nominais de ensaio.

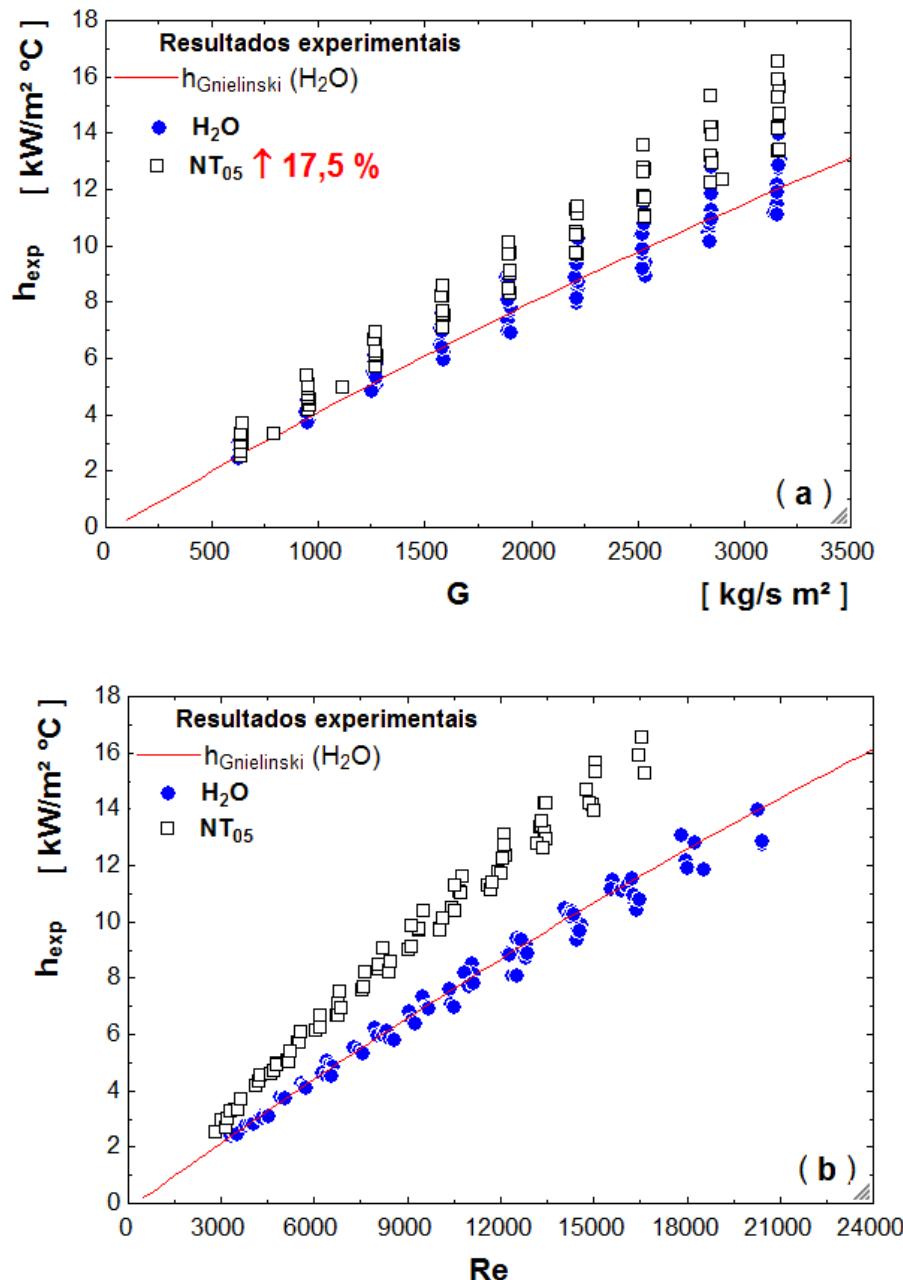


Figura 4.31 – Comparação dos resultados experimentais do coeficiente de transferência de calor para a amostra NT05 e  $\text{H}_2\text{O}$ ; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

Destaca-se, ainda, que a amostra NT05, apresentou condutividade térmica, em média, 45,1 % superior a da água. Assim, o acréscimo no coeficiente de transferência de calor da amostra

de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O se justifica devido à alteração da condutividade térmica.

### Efeito da concentração de nanopartículas sobre a transferência de calor

Da mesma forma que a fração de nanopartículas dispersas na matriz líquida afeta os resultados da perda de carga devido, principalmente, a mudanças na viscosidade a quantidade de partículas sólidas dispersas no fluido afeta o coeficiente de transferência de calor por convecção devido, principalmente, à mudanças na condutividade térmica da suspensão. Porém, de acordo com a literatura, a variação no coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação ao fluido base não decorre exclusivamente da variação da condutividade térmica. Todos os modelos matemáticos derivados para a predição das propriedades termofísicas de nanofluidos consideram a fração volumétrica de nanopartículas. No entanto, ainda se discute a capacidade dos modelos convencionais para predizer o coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos a partir do uso das propriedades (previstas pelos modelos).

Considerando que a fração em massa ou em volume de partículas dispersas é um parâmetro que afeta as propriedades dos chamados nanofluidos e, consequentemente, suas características de transporte térmico, é apresentada, a seguir, a comparação dos resultados experimentais levantados para o coeficiente de transferência de calor de amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O preparadas com diferentes concentrações em massa de nanotubos de carbono e os dados experimentais levantados para o coeficiente de transferência de calor da água (fluido base).

Para avaliar o efeito da fração em massa de nanotubos de carbono na suspensão, sobre o coeficiente de transferência de calor as amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT02 e NT04, foram produzidas, respectivamente, com concentração em massa de nanopartículas,  $\phi = 0,25\%$  e  $\phi = 0,50\%$ . Ambas as amostras, como observado na Tabela 4.1, empregaram nanotubos de carbono funcionalizados (Dispersible Multi-Wall).

A Figura 4.32 ilustra o efeito da concentração em massa de nanotubos de carbono em dispersão na água sobre a transferência de calor,  $h_{exp}$ , pela comparação dos resultados experimentais levantados para as amostras NT02 e NT04. Na Fig. 4.32 (a) o coeficiente de transferência de calor é apresentado em função da velocidade mássica,  $G$ , e na Fig. 4.32 (b) são apresentados os mesmos resultados, porém com  $h_{exp} \times Re$ .

Verifica-se que o coeficiente de transferência de calor da amostra NT04 é, em média,

6,3 % superior ao da amostra NT02. Na Fig. 4.32 (b), com  $h_{exp}$  em função de  $Re$  a diferença também pode ser facilmente visualizada.

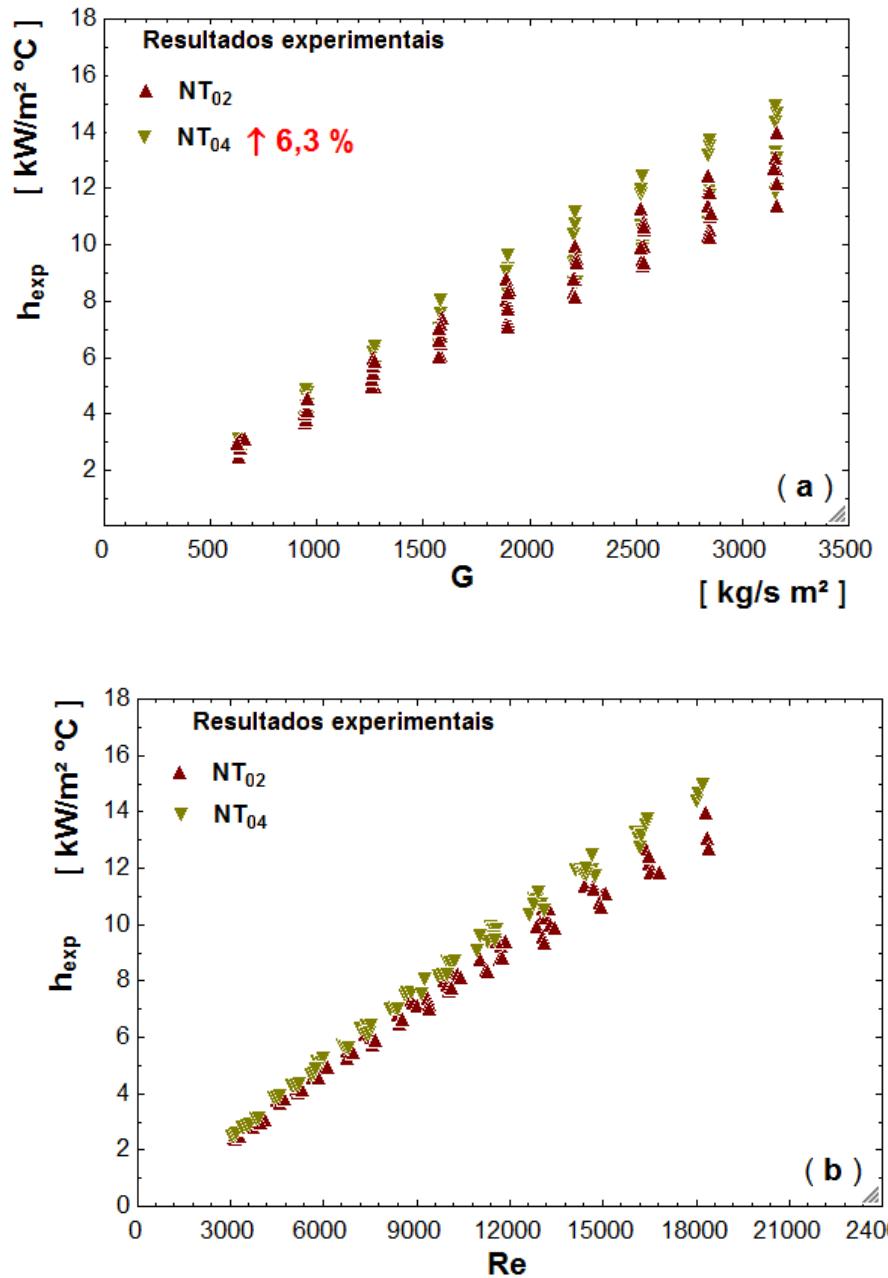


Figura 4.32 – Efeito da fração em massa de nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT02 e NT04; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

Cabe destacar, porém que, como ilustrado na Figura 4.28 (a), os resultados levantados para o coeficiente de transferência de calor da amostra NT02 são inferiores ao da água. Por sua vez, quando os resultados são apresentados em função do número de Reynolds (Fig. 4.32 (b)) o coeficiente de transferência de calor de ambas as amostras torna-se superior ao da água.

Devido ao fato de que os resultados levantados para o coeficiente de transferência de

calor da amostra de nanofluido, NT02, terem sido inferiores ao da água, não é possível obter conclusões quantitativas sobre o efeito da concentração em massa de nanopartículas sobre o acréscimo do coeficiente de transferência de calor do nanofluido em relação a água, porém, considerando as duas amostras, o efeito fica claramente caracterizado.

### **Efeito da razão de aspecto dos nanotubos sobre a transferência de calor**

A forma das nanopartículas dispersas na matriz líquida também é considerada como um fator que afeta, de maneira relevante, as propriedades dos chamados nanofluidos. A elevada razão de aspecto, dos nanotubos de carbono, é também apontada como sendo fortemente responsável pelo incremento das propriedades de transporte térmico nos nanofluidos preparados a partir deste tipo de nanopartícula. Entre as justificativas apontadas para o incremento *anormal* das propriedades de transporte térmico das suspensões de NTCs está o fato de que na superfície do nanotubo, o processo de transporte de calor seria muito mais intenso e, devido ao relativo comprimento os nanotubos formariam uma grande malha, contribuindo ainda mais para incrementar o transporte de calor. Assim, a forma das nanopartículas torna-se ainda mais importante, pois, além de afetar diretamente características como a área superficial específica das nanopartículas e possibilitar a intensificação do transporte de calor o formato de tubo ou fio pode alterar as características finais do nanofluido, devido ao fato de que, como se observa em imagens disponíveis na literatura, nanopartículas com grande razão de aspecto formam grandes emaranhados e apresentam a tendência de se aglomerarem mais fortemente quando dispersas em líquidos, conforme mencionado anteriormente.

De acordo com o apresentado na Tabela 4.1, os nanotubos de carbono empregados na preparação das amostras apresentam diferentes razão de aspecto,  $r = L/d$ . Assim, considerando as amostras NT03 e NT04, ambas preparadas com mesma fração em massa de nanotubos, o provável efeito da razão de aspecto dos nanotubos em suspensão sobre a transferência de calor pode ser avaliado comparando-se os resultados experimentais da transferência de calor das amostras NT03 e NT04, ambas preparadas a partir de nanotubos de carbono facilmente dispersáveis.

A Figura 4.33 ilustra o efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono em dispersão na água sobre a transferência de calor,  $h_{exp}$  por intermédio da comparação dos resul-

tados levantados para as amostras NT03 e NT04, preparadas com a mesma fração em massa de nanopartículas,  $\phi = 0,50\%$ , porém, empregando nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersáveis de diferentes geometrias, isto é, razão de aspecto  $r = 100$  e  $r = 2400$ , respectivamente.

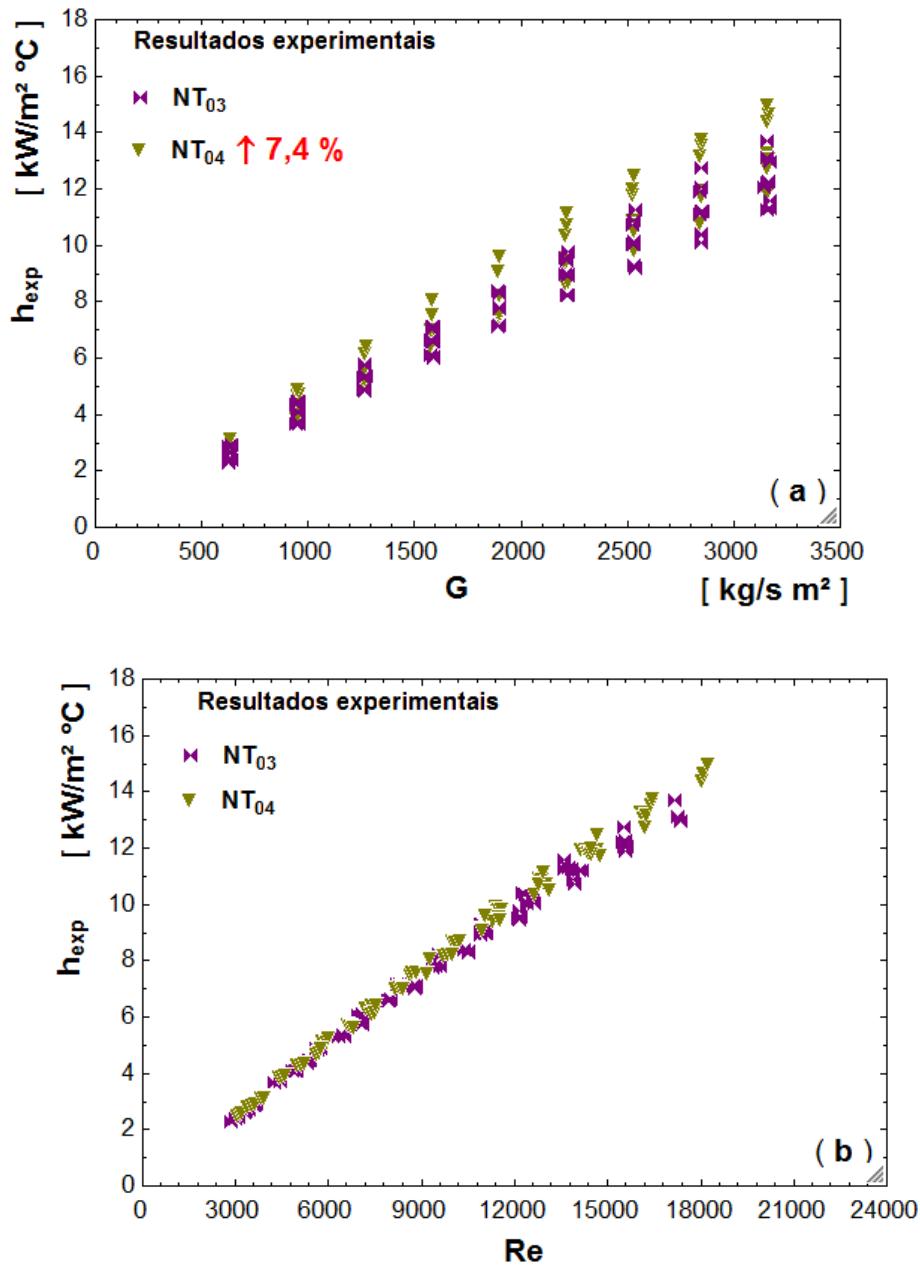


Figura 4.33 – Efeito da razão de aspecto dos nanotubos de carbono na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT03 e NT04; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

Pode ser observado na Fig. 4.33 (a) que o coeficiente de transferência de calor da amostra NT04 é, em média, 7,4% superior ao da amostra NT03. A mesma tendência pode ser observada na Fig. 4.33 (b), onde o  $h_{exp}$  é apresentado em função do número de Reynolds,  $Re$ ,

calculado a partir das propriedades das suspensões. O número de Reynolds da amostra NT04 é, em média, 4,7% superior ao da amostra NT03, refletindo a diferença encontrada na medida da viscosidade das amostras (Tabela 4.4).

Observa-se, porém, que em termos da transferência de calor esta análise fica prejudicada em decorrência dos resultados da transferência de calor apresentados nas Figs. 4.28 e 4.29 para as amostras NT02 e NT03, respectivamente. Assim, a transferência de calor destas amostras é inferior a do fluido base e a aparente deterioração da capacidade de transferência de calor da água, nestes dois casos, não decorre nem da concentração de nanotubos na suspensão e nem da razão de aspecto dos mesmos. Por outro lado, estes dois parâmetros devem influenciar na preparação da suspensão e, consequentemente nas características finais da mesma.

Conforme mencionado anteriormente, as características finais da suspensão dependem de diversos fatores e, a razão de aspecto das nanopartículas desempenha papel importante em relação à estabilidade e homogeneidade da suspensão. Especialmente no caso de partículas na forma de fibras, como os nanotubos de carbono, há uma maior tendência para a aglomeração das nanopartículas quando dispersas numa matriz líquida.

### **Efeito da natureza dos nanotubos sobre a transferência de calor**

De acordo com o exposto anteriormente, as nanopartículas são sintetizadas por diferentes processos, purificadas segundo as mais variadas técnicas e funcionalizadas física ou quimicamente para atender à aplicações específicas. Naturalmente, em escala nanométrica, tantas variáveis implicam em um produto bastante heterogêneo, mas como é o caso dos nanotubos de carbono, comercialmente, são especificados somente por seu número de paredes, diâmetro e comprimento.

As amostras NT01, NT04 e NT05, todas preparadas com fração em massa de nanotubos de carbono,  $\phi = 0,50\%$ , porém com de nanotubos de carbono de diferentes espécimes, ou seja, as amostras foram produzidas, respectivamente, a partir de uma solução aquosa concentrada de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (3 wt % Multi-walled Carbon Nanotubes in Water), de nanotubos de carbono de paredes múltiplas funcionalizados (Dispersible Multi-Wall), facilmente dispersíveis e de nanotubos de paredes múltiplas, na forma de pó, assim como produzidos (Multi-walled Carbon Nanotubes). As referidas amostras foram, produzidas, pelo processo

de duas etapas conforme descrito na Seção 4.3.

A Figura 4.34 ilustra os resultados da transferência de calor para as amostras NT01, NT04 e NT05, em função da velocidade mássica (Fig. 4.34 (a)) e em função do número de Reynolds (Fig. 4.34 (b)).

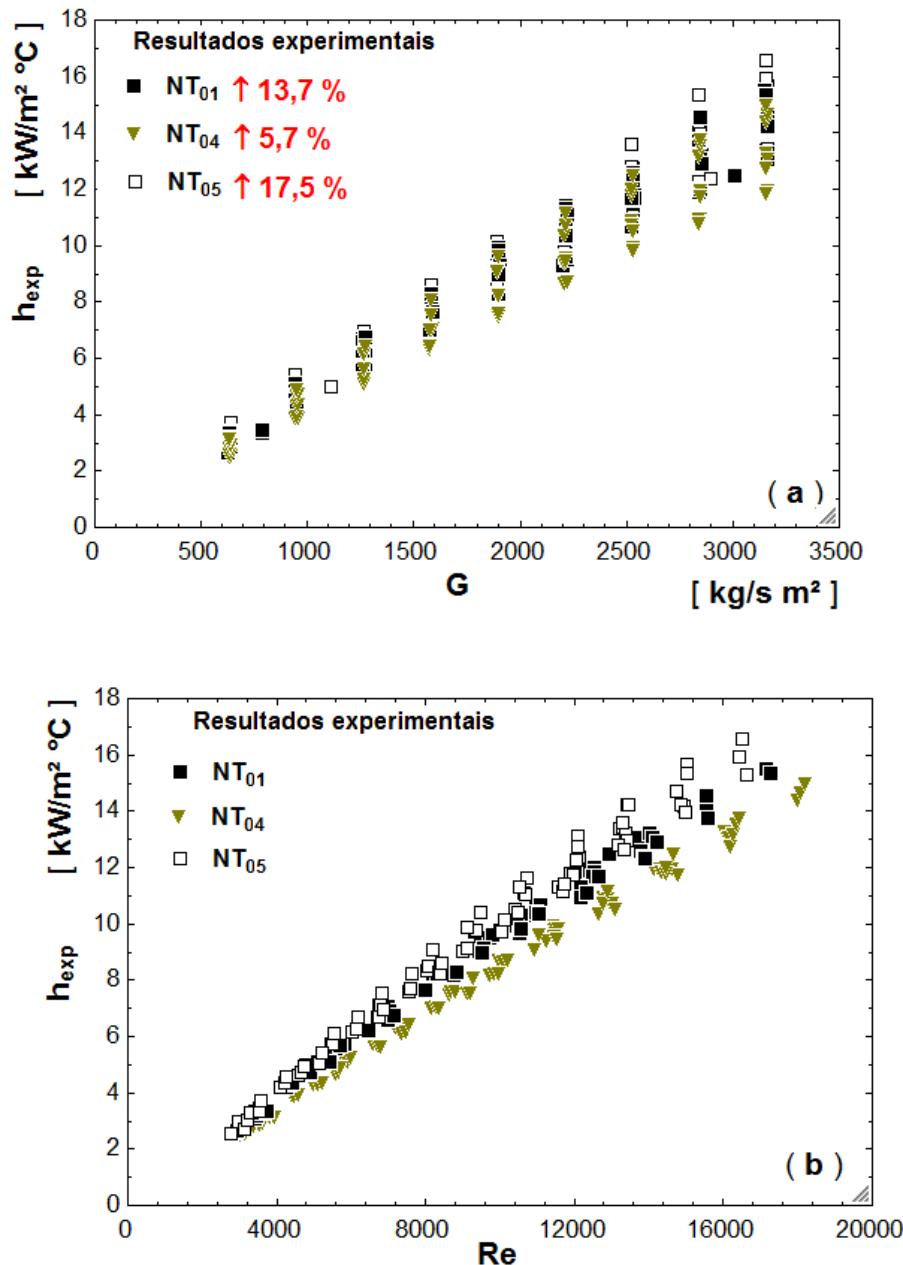


Figura 4.34 – Efeito do espécime de nanotubos de carbono utilizado na preparação na dispersão, comparação dos resultados experimentais para NT01, NT04 e NT05; (a)  $h_{exp} \times G$ , (b)  $h_{exp} \times Re$

No gráfico  $h_{exp} \times G$  (Fig. 4.34 (a)), conforme as Figs. 4.27(a), 4.30 (a) e 4.31 (a), observa-se o incremento no coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido de

NTCs/H<sub>2</sub>O, em relação à água destilada, de 13,5 %, 5,7 % e 17,5 %, em média, respectivamente. Os resultados encontrados para o incremento do coeficiente de transferência de calor das amostras é proporcional ao aumento encontrado para a condutividade térmica das mesmas.

Por sua vez, na Fig. 4.34 (b), para  $h_{exp} \times Re$  a diferença no coeficiente de transferência de calor das amostras em relação ao da água é ainda mais evidente. Cabe lembrar no entanto, que o número de Reynolds das amostras é determinado empregando-se os resultados calculados e/ou experimentalmente levantados e, neste caso, em relação ao  $Re$  da água, o número de Reynolds das amostras NT01, NT04 e NT05, são respectivamente 14,2 %, 10,5 % e 17,5 % menores.

#### 4.5.3 Resultados Experimentais - Efeito dos Parâmetros de Ensaio

Na transferência de calor por convecção, a contribuição dominante resulta da movimentação global das partículas do fluido. Assim, além da dependência das propriedades do fluido, o coeficiente de transferência de calor depende da geometria e das condições de escoamento.

No presente estudo, foi utilizada uma única geometria, isto é, o escoamento do fluido acontece no interior de um tubo circular reto e horizontal cujo diâmetro interno é de 6,35 mm e comprimento de 2,48 m. Entretanto, diferentes condições de escoamento (velocidade), fluxo específico de calor constante pela parede e diferentes fluidos foram utilizados. O estudo foi, desde o princípio, fundamentado no controle e medição dos parâmetros e variáveis, que possibilitam determinar, experimentalmente, o coeficiente de transferência de calor por convecção, de modo que, os parâmetros de ensaio foram, especificamente, a temperatura de entrada do fluido na seção de testes (10, 15 e 20 °C), o fluxo específico de calor pela parede do tubo (10, 14 e 18 kW/m<sup>2</sup>) e a vazão mássica, variando na faixa de 20 a 100 g/s, com incremento de 10 g/s.

Nesta seção, serão apresentados os efeitos de tais parâmetros sobre o incremento do coeficiente de transferência de calor da versão nanofluídica em relação ao fluido base.

#### Efeito da vazão mássica

A totalidade dos dados experimentais levantados, para as amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com mesma concentração em massa de nanopartículas (0,5 %) e sob as mesmas condições de ensaio, foram utilizados para a comparação do coeficiente de transferência de calor

experimental da versão nanofluídica com o da água destilada. Tadas as amostras foram ensaiadas numa faixa de vazão mássica variando de 10 a 100  $g/s$ , resultando, na seção de teste, um escoamento com velocidades variando entre 600 e 3200  $Kg/s.m^2$ .

A figura 4.35 ilustra os resultados experimentais levantados para o coeficiente de transferência de calor da amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT01, através de ensaios realizados com fluxo específico de calor pela parede de 10  $kW/m^2$  e com temperatura de entrada de 10, 15 e 20 °C.

O efeito do incremento da vazão mássica sobre o acréscimo do coeficiente de transferência de calor da amostra, NT01, em relação ao coeficiente de transferência de calor da água destilada é, claramente, observado para as vazões mássicas de 20, 50 e 90  $g/s$ . Assim, o aumento médio no coeficiente de transferência de calor da amostra, NT01, em relação ao coeficiente de transferência de calor da água destilada foi, em média, 7, 10 e 14% para as vazões mássicas de 20, 50 e 90  $g/s$ , respectivamente.

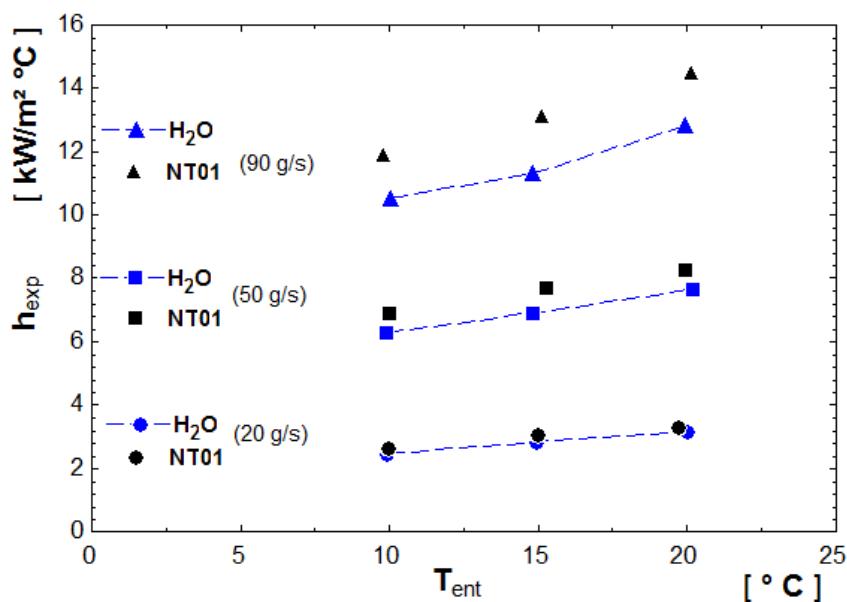


Figura 4.35 – Coeficiente de transferência de calor do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O (amostra NT01) e água destilada para fluxo de calor de 10  $kW/m^2$  e vazões mássicas de 20, 50 e 90  $g/s$ .

### Efeito da temperatura de entrada

Foram realizados ensaios com temperatura de entrada do fluido na seção de teste em 10, 15 e 20 °C. Verificou-se, assim como no caso da vazão mássica, que a temperatura do

fluído afeta o coeficiente de transferência de calor por convecção. No entanto, de acordo com o que se pode observar na Fig 4.35, não foi possível quantificar o efeito da temperatura média do fluido sobre o incremento do coeficiente de transferência de calor do nanofluido, uma vez que, os dados estão sendo confrontados em termos da vazão mássica e não do número de Reynolds. A temperatura de entrada do fluido reflete-se na temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da seção de testes, afetando, diretamente as propriedades do fluido, de modo que, o efeito da temperatura sobre o coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos parece mais evidente quando a comparação é realizada em termos do número de Reynolds (Fig. 4.27 a 4.31 (b)).

### Efeito do fluxo de calor

A figura 4.36 ilustra os resultados experimentais da amostra NT01 e da água destilada para temperatura de entrada de  $10^{\circ}C$  e vazões mássicas de 20, 50 e 90  $g/s$ , para diferentes condições de fluxo de calor constante na parede do tubo.

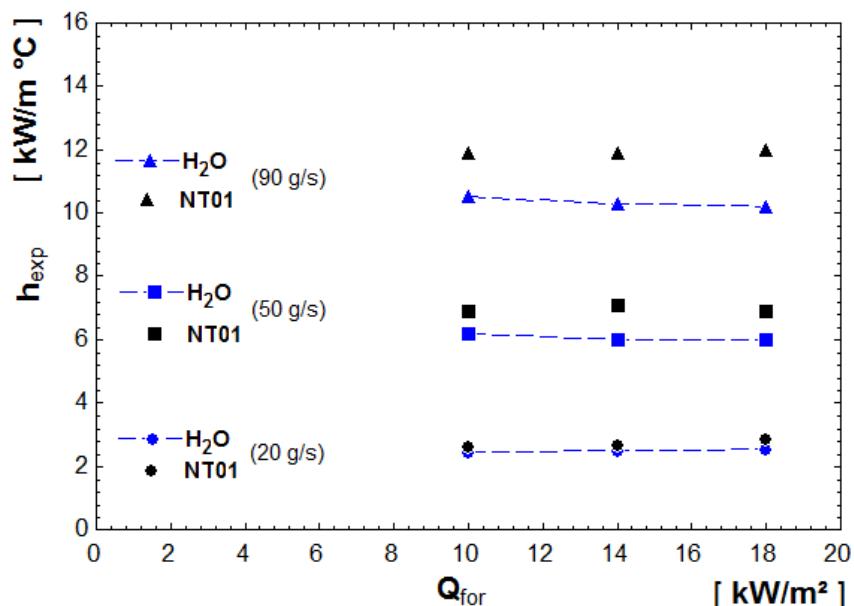


Figura 4.36 – Coeficiente de transferência de calor por convecção da versão nanofluídica, amostra NT01, e água destilada para  $T_{ent}$  de  $10^{\circ}C$  e vazões mássicas de 20, 50 e 90  $g/s$ .

Os experimentos foram realizados com fluxo de calor de 10, 14 e 18  $\text{kW}/\text{m}^2$  e, neste caso, também não há evidências claras de que tal parâmetro afete, significativamente, aumento do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação ao fluido base, uma vez que,

como pode ser observado na Fig. 4.36, o aumento do coeficiente de transferência de calor do nanofluido em relação ao da água não apresenta um comportamento regular.

Um resumo geral, resultante da comparação dos dados levantados para as amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com os resultados levantados para á água (fluído base), é apresentado na Tabela 4.6. As propriedades termofísicas das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O foram determinadas conforme anteriormente mencionado. O número de Reynolds foi determinado, considerando as propriedades do fluido base e do nanofluido na temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da seção de testes. Por sua vez, a perda de carga por unidade de comprimento e o coeficiente de transferência de calor foram determinados experimentalmente.

A Tabela 4.6 mostra a diferença média percentual das propriedades e variáveis das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O em relação à água destilada (fluído base).

Tabela 4.6 – Comparação dos resultados experimentais levantados para as amostras em relação à água.

AMOSTRA	<i>r</i>	$\phi$	$\rho$	$\mu$	$c_p$	<i>k</i>	<i>Re</i>	$\Delta P_{exp}/L$	$h_{exp}$
NT01 <sup>a</sup>	800	0,5 %	0,5	16,7	-0,4	37,7	-14,2	9,6	13,7
NT02 <sup>b</sup>	600	0,25 %	0,3	9,7	-0,2	6,3	-8,7	5,6	-0,7
NT03 <sup>b</sup>	100	0,5 %	0,5	17,0	-0,4	8,8	-14,5	8,7	-2,6
NT04 <sup>b</sup>	2400	0,5 %	0,5	11,7	-0,4	17,0	-10,5	8,6	5,7
NT05 <sup>c</sup>	300	0,5 %	0,5	21,4	-0,4	45,1	-17,5	8,6	17,5

(*a*) Solução - 3 *wt %* Multi-walled Carbon Nanotubes in Water;

(*b*) Funcionalizados - Dispersible Multi-Wall Carbon Nanotubes;

(*c*) como produzidos - Multi-Wall Carbon Nanotubes.



# CAPÍTULO V

## ESTUDO DAS CORRELAÇÕES

### 5.1 Introdução

Quando partículas metálicas ou não metálicas de elevada condutividade térmica, com dimensões inferiores a  $100\text{ nm}$ , são dispersas em líquidos convencionais de transferência de calor, a condutividade térmica efetiva do meio resultante aumenta substancialmente. Materiais nanoestruturados podem ter um grande impacto sobre os fluidos utilizados para o transporte de calor nos trocadores de calor. A partir dos estudos iniciais de Masuda et al. (1993), estudos posteriores de outros pesquisadores, tais como, Choi (1995), Wang et al. (1999) e Eastman et al. (2001) demonstraram que a condutividade térmica e a viscosidade de líquidos são alteradas pela dispersão de partículas ultrafinas. Consequentemente, para o mesmo número de Nusselt do escoamento de fluido numa dada passagem de fluxo, se a condutividade térmica aumenta, a transferência de calor por convecção também aumenta na mesma proporção.

Nanofluidos possuem aplicações importantes em diversos tipos de indústrias. Nessas condições, geralmente, o regime de escoamento do fluido é turbulento, visto que, é nessa faixa que se consegue obter as melhores taxas de transferência de calor. Entretanto, as características de transferência de calor e a dinâmica de fluido dos nanofluidos, nas condições de fluxo turbulento, devem ser conhecidas com a máxima exatidão, para que se possa avaliar o seu desempenho corretamente.

Alguns trabalhos sobre as características de fluxo de nanofluidos em regime turbulento

são encontrados na literatura aberta. Entretanto, os resultados de medições do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor por convecção, assim como, das propriedades termofísicas dos nanofluidos ainda são incipientes. Alguns resultados concordam satisfatoriamente com os valores previstos pelas correlações clássicas para fluidos puros. Em outros casos, as correlações clássicas são ineficazes e subestimam os resultados experimentais levantados para as amostras de nanofluido e os pesquisadores têm apresentado novas correlações. Assim, foram analisados os modelos derivados para a predição das propriedades termofísicas dos nanofluidos, especialmente para a condutividade térmica e viscosidade. A revisão também foi estendida para as correlações desenvolvidas para a determinação do coeficiente de transferência de calor e fator de atrito de nanofluido, escoando em um tubo liso sob as condições de fluxo laminar e turbulento. No entanto, as correlações convencionais para a transferência de calor por convecção e coeficiente de atrito de nanofluido apresentam elevada dispersão e, como consequência, diversas correlações foram desenvolvidas para a estimativa do número de Nusselt e do coeficiente de atrito de nanofluidos, tanto para as condições de escoamento laminar quanto para regime turbulento no interior de um tubo.

Neste capítulo, são apresentadas as comparações dos resultados experimentais com os valores previstos a partir de diferentes modelos para a predição da viscosidade e da condutividade térmica. Em seguida, são apresentadas as comparações dos resultados experimentais levantados para o fator de atrito e para o coeficiente de transferência de calor das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, com os valores calculados a partir de correlações disponíveis na literatura. Finalmente, é apresentada uma correlação desenvolvida a partir dos resultados experimentais do presente estudo.

## 5.2 Propriedades Termofísicas de Nanofluidos

As propriedades térmicas e físicas, como densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos têm sido calculadas utilizando as correlações mais comuns encontradas na literatura, nas quais o principal parâmetro considerado é a concentração em volume de nanopartículas na suspensão. Neste sentido, para a subsequente análise, procedeu-se à análise dos resultados experimentais, calculando-se a média referente às amostras ensaiadas

NT01, NT03, NT04 e NT05, todas com concentração de 0,5% em massa. Neste trabalho, conforme anteriormente registrado, a densidade adotada para as amostras de nanotubos de carbono é de  $2,1\text{ g/cm}^3$ , resultando uma fração em volume de nanotubos na suspensão de 0,24% e a condutividade térmica dos nanotubos de carbono foi adotada como sendo de  $3000\text{ W/m}^\circ\text{C}$  (Tabela 2.1).

A construção de modelos empíricos, para a predição das propriedades termofísicas dos nanofluidos é, atualmente, um grande desafio. Posto que os resultados experimentais levantados por diversos grupos de pesquisa, são necessariamente, superiores aos valores previstos pelos modelos clássicos e, além disso, os novos modelos apresentados só reproduzem, razoavelmente, os dados experimentais específicos do trabalho em estudo. Observou-se que diferentes fenômenos termofísicos podem ocorrer quando se manipula a matéria em escala atômica. Os parâmetros que, em escala macroscópica, estão bem fundamentados, podem apresentar comportamentos distintos e, até mesmo concorrentes, quando observados em escala nanométrica. Fatores, cujo efeito pode ser negligenciado em escala macroscópica, em alguns casos, podem tornar-se dominantes em escala atômica.

As técnicas, dispositivos e instrumentos idealizados para a manipulação e medição das propriedades termofísicas de fluidos puros, de alguma forma, podem também não responder eficazmente às medições das propriedades termofísicas de suspensões contendo nanopartículas, as quais, comprovadamente, são sensíveis à campos elétricos e magnéticos externos. Nesses termos, não seria estranho se tais suspensões apresentassem comportamento diferente quando expostas a gradientes de temperatura e pressão, por exemplo.

### 5.2.1 *Viscosidade*

A viscosidade das amostras de nanofluido de  $\text{NTCs/H}_2\text{O}$  foi medida e encontrado um aumento médio de até 20% em relação ao fluido base (Tabela 4.4). A análise mostrou que a viscosidade aumenta com o aumento da fração de nanotubos de carbono na suspensão e diminui com o aumento da temperatura, como seria de esperar. Também foi detectado que, para uma mesma fração em volume de nanotubos na suspensão, a natureza das nanopartículas tem efeito significativo sobre o aumento da viscosidade, provavelmente, decorrente de diferenças

nas características finais da suspensão, tais como o tamanho e a quantidade de aglomerados de nanotubos de carbono.

É importante observar que, conforme observado na Tabela 2.3, o clássico modelo de Einstein, (eq. (5.1)), originalmente desenvolvido, em 1906, para partículas esféricas e sem interação entre si é, ainda, a base para os demais modelos. Além disso, a viscosidade do fluido base, dependente da temperatura, é considerada em todos os modelos, de modo que, a relação  $f(\theta, T)$ , aparece em todos os modelos derivados para a predição da viscosidade dos nanofluidos.

A Fig. 5.1 ilustra os resultados experimentais levantados para o nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com concentração de 0,24 % em volume de nanopartículas, os valores medidos da viscosidade da água destilada e os valores previstos a partir dos modelos clássicos.

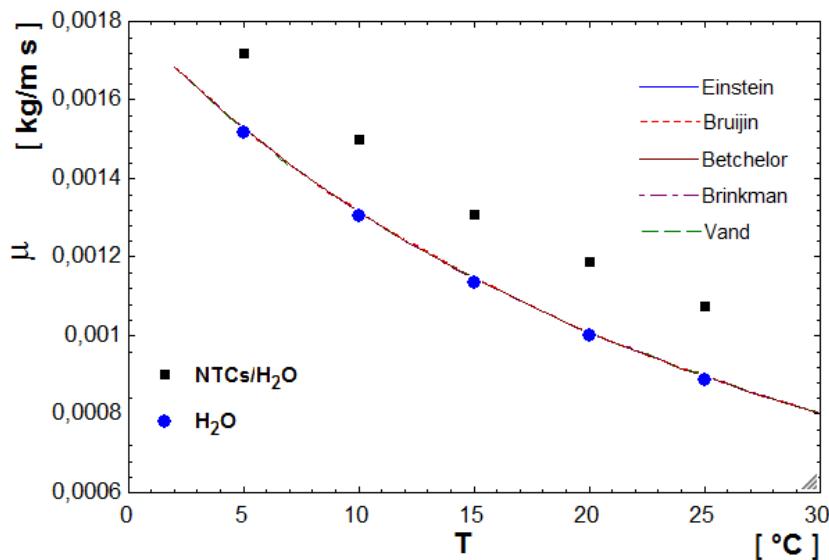


Figura 5.1 – A comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos obtidos a partir das equações de modelos clássicos de previsão da viscosidade de suspensões sólido-líquido.

É possível observar que os modelos clássicos aparecem todos sobrepostos e falham na predição da viscosidade de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Observa-se, ainda, que os valores calculados a partir dos modelos estão muito próximos dos valores medidos para a viscosidade da água destilada e isso pode ser atribuído à baixa concentração em volume de nanopartículas. Além disso, observa-se que a variação da viscosidade da amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com a temperatura, acompanha a variação da viscosidade do fluido base (água destilada).

Diferentes modelos para a predição da viscosidade da nanofluidos foram, recentemente, desenvolvidos. Williams et al. (2008) desenvolveram o modelo expresso na eq. (5.2). Segundo os

autores, a referida equação resulta do ajuste de curvas dos dados experimentais da viscosidade do nanofluido de  $ZrO_2/H_2O$ , obtido pela diluição de uma solução coloidal em água deionizada com concentração em volume de 0,2 a 0,9 %. Os valores experimentais levantados numa faixa de temperatura entre 20 e  $80^{\circ}C$ . Entretanto, no presente estudo a viscosidade das amostras de nanofluido de  $NTCs/H_2O$  foi medida na faixa de temperaturas entre 5 e  $25^{\circ}C$ .

A Fig. 5.2 apresenta os resultados experimentais levantados para o nanofluido de  $NTCs/H_2O$  com concentração de 0,24 % em volume de nanopartículas, os valores medidos da viscosidade da água destilada e os valores previstos a partir dos principais modelos, especialmente, desenvolvidos para nanofluidos.

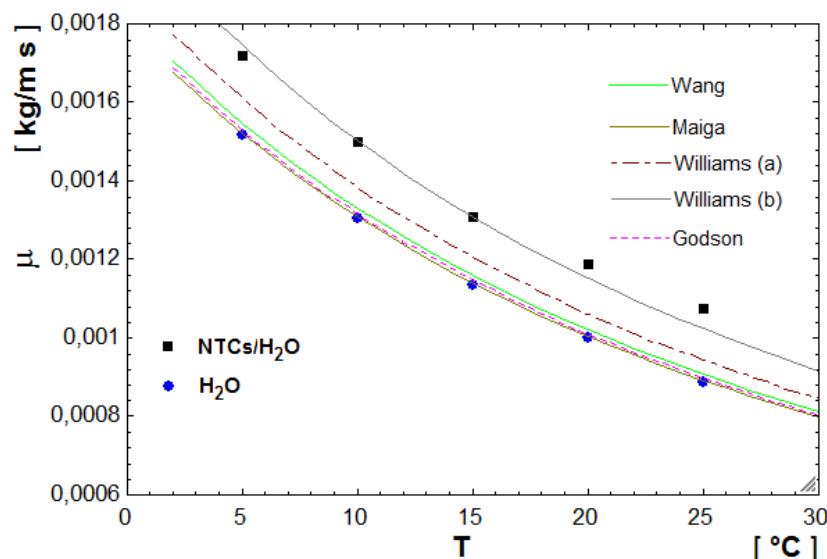


Figura 5.2 – Viscosidade do nanofluido  $NTCs/H_2O$ , água destilada e os valores previstos pelos modelos.

A média dos valores medidos para a viscosidade das amostras de nanofluido de  $NTCs/H_2O$ , apresentados na Tabela 4.4, é aqui comparada com os valores previstos pelos modelos de Einstein (EINSTEIN, 1906) e de Williams (WILLIAMS *ET AL*, 2008), dados pelas equações (5.1) e (5.2), respectivamente.

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \theta) \mu_{fb}, \quad (5.1)$$

$$\mu_{nf} = \left( e^{\frac{11,19 \theta}{(0,1960 - \theta)}} \right) \mu_{fb}, \quad (5.2)$$

onde,  $\theta$  é a concentração em volume de nanopartículas na suspensão,  $\mu_{nf}$  e  $\mu_{fb}$  a viscosidade do nanofluido e do fluido base, respectivamente.

Em ambos os casos, o valor da viscosidade da água ( $\mu_{fb}$ ) foi calculado, considerando a temperatura e por intermédio do programa EES. Os resultados experimentais do presente estudo apresentaram um desvio médio de apenas 1,9% em relação ao modelo de Williams, podendo então, ser empregado para a predição da viscosidade de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, com concentração em volume de nanotubos de 0,24%. Entretanto, o modelo de Einstein (eq. (5.1)), por sua vez, subestima os valores da viscosidade com um desvio médio de 15%, não sendo adequado para a previsão da viscosidade de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Observa-se ainda que, exceto o modelo de Williams, todos os demais são expressos como funções da viscosidade do fluido base e da concentração volumétrica de nanopartículas e, segundo os próprios autores estes modelos resultam do ajuste de curvas dos resultados experimentais, sendo válidos, especificamente, para as amostras do nanofluido em estudo.

### 5.2.2 *Condutividade térmica*

A elevada condutividade térmica é a principal característica dos nanofluidos e tem sido alvo de estudo de diversos autores, tanto em nível teórico quanto experimental. Eastman et al. (1997) preparam amostras de nanofluidos pela dispersão de nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO e Cu em água e identificaram, além da boa estabilidade, um aumento significativo da condutividade térmica das suspensões. Os autores apontaram, ainda, que as amostras preparadas com partículas de elevada condutividade térmica apresentaram maior aumento na condutividade térmica do nanofluido relativo ao fluido base.

A partir do trabalho de Eastman et al. (1997) diversos grupos de pesquisa passaram a orientar seus trabalhos sobre o estudo da condutividade térmica de nanofluidos com o objetivo de quantificar o incremento da condutividade térmica e conhecer os mecanismos e fatores responsáveis pela intensificação. Entre os fatores mais comumente apontados como sendo aqueles com efeitos significativos na condutividade térmica dos nanofluidos destacam-se: o tamanho e a forma das nanopartículas, a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão, a temperatura e o material das nanopartículas e da matriz líquida.

Conforme anteriormente mencionado, percebem-se divergências entre os autores e incoerências quanto a real influência destes fatores sobre o incremento da condutividade térmica

dos nanofluidos. Assim, diferentes grupos de pesquisa desenvolveram teorias no esforço em explicar e confirmar a influência de outros fatores, tais como a acidez (pH), a presença de aditivos, nanocamada superficial, movimento Browniano, aglomerados de nanopartículas e potencial interpartículas.

De maneira análoga ao que ocorre com os modelos para a previsão da viscosidade de suspensões de partículas sólidas em uma matriz líquida, diversos modelos foram desenvolvidos para determinar a condutividade térmica de nanofluidos. O primeiro modelo para a predição da condutividade de misturas foi proposto por Maxwell (MAXWELL, 1873). Como observado na Tabela 2.2, além do modelo de Maxwell, existem outros modelos disponíveis para a determinação da condutividade térmica de suspensões sólido-líquido. No entanto, tais modelos apresentam grandes divergências em relação aos resultados experimentais.

Os resultados experimentais da condutividade das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O são confrontados com os valores calculados a partir de modelos teóricos clássicos para misturas sólido-líquido e de modelos atuais para nanofluidos nas Figs. 5.3 e 5.4, respectivamente.

A Figura 5.3 mostra os resultados experimentais para condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O e da água destilada, superpostos com as correlações clássicas de Maxwell, Hamilton e Crosser, Jeffery (1973), Wasp (1977) e Yamada e Ota (1980), dadas, respectivamente, pelas equações (5.3), (5.4), (5.5), (5.6) e (5.7).

$$k_{nf} = k_{fb} \left( 1 + \frac{3(a-1)\theta}{(a+2)-(a-1)\theta} \right), \quad (5.3)$$

$$k_{nf} = k_{fb} \left( \frac{a+(n-1)-(n-1)(1-a)\theta}{a+(a+1)+(a-1)\theta} \right), \quad (5.4)$$

$$k_{nf} = k_{fb} \left( 1 + 3B\theta + \left( 3B^2 + \left( \frac{3}{4} \right) B^3 + \left( \frac{9}{16} \right) B^3 \left( \frac{a+2}{a+3} \right) \right) \theta^2 + \dots \right), \quad (5.5)$$

$$k_{nf} = k_{fb} \left( \frac{k_p - 2k_{fb} - 2\theta(k_{fb} - k_p)}{k_p + 2k_{fb} + \theta(k_{fb} - k_p)} \right), \quad (5.6)$$

$$k_{nf} = k_{fb} \left( \frac{(k_p/k_{nf}) - 2\theta^{0,2}r - 2\theta^{1,2}r(1 - (k_p/k_{nf}))}{(k_p/k_{nf}) + 2\theta^{0,2}r + \theta(1 - (k_p/k_{nf}))} \right) \quad (5.7)$$

onde  $k_{nf}$ ,  $k_{fb}$  e  $k_p$  representam a condutividade térmica do nanofluido, do fluido base e da nanopartícula, respectivamente.  $\theta$  é a concentração em volume de nanopartículas na suspensão,

$a = (k_p/k_{fb})$ ,  $B = (a - 1)/(a + 2)$ ,  $n$  é a esfericidade (fator de forma) e  $r = (L_p/d_p)$  é a razão de aspecto da nanopartícula.

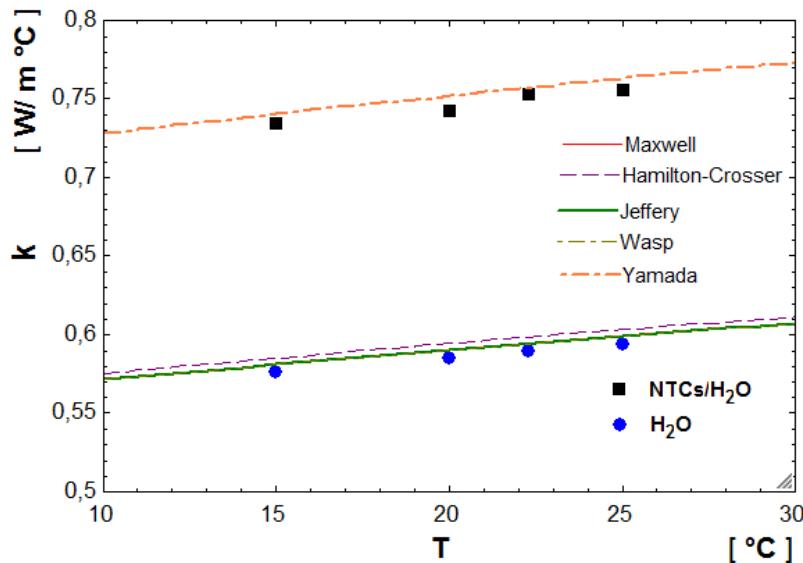


Figura 5.3 – Comparaçāo entre as correlaçāes clássicas e os resultados experimentais para a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, ( $\theta = 0,24\%$ ).

Observa-se que com exceção do modelo de Yamada, todos os demais subestimam a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O. Entretanto, o modelo de Yamada, é sensível a razão de aspecto (relação comprimento/diâmetro) das partículas cilíndricas, tais como os nanotubos de carbono e, como observado, este parâmetro é o que apresenta maior influência na expressão. Assim, variando-se a razão de aspecto  $r$ , foi possível conseguir uma boa concordância com os resultados experimentais, por exemplo, para  $r = 200$ , o desvio médio dos valores calculados pela correlaçāo de Yamada, em relaçāo aos resultados experimentais, foi inferior a 1 %.

Em relaçāo aos modelos atuais, especialmente desenvolvidos para nanofluidos, existem inúmeras teorias e diversos fatores considerados influentes na condutividade térmica das suspensões de nanopartículas. Tais correlaçāes envolvem a determinaçāo de constantes empíricas que, em muitos casos, foge ao escopo deste trabalho. Assim, para a comparaçāo dos resultados experimentais foram escolhidos, dentre os diversos modelos desenvolvidos, mais recentemente, para a prediçāo da condutividade térmica de nanofluidos, aqueles cujos parâmetros tem sido mais atentamente observados durante o desenvolvimento dos experimentos.

Na Figura 5.4, foram superpostas com os resultados experimentais as curvas equivalentes aos modelos propostos por Maiga et al. (2006), Timofeeva et al. (2007), Williams et al. (2008)

e Khanafer e Vafai (2011), cujas correlações são representadas pelas equações (5.8), (5.9), (5.10) e (5.11), respectivamente.

$$k_{nf} = k_{fb} (28,905 \theta^2 + 2,28273 \theta + 1), \quad (5.8)$$

$$k_{nf} = k_{fb} (1 - 3\theta), \quad (5.9)$$

$$k_{nf} = k_{fb} (4,55503 \theta + 1), \quad (5.10)$$

$$k_{nf} = k_{fb} \left( 1 + 1,0112 \theta + 2,4375 \theta \left( \frac{47}{dp} \right) - 0,0248 \theta \left( \frac{k_p}{0,613} \right) \right), \quad (5.11)$$

onde  $\theta$  é a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão,  $k_{fb}$  é a condutividade térmica do fluido base,  $k_p$  é a condutividade térmica das nanopartículas e  $d_p$  é o diâmetro das nanopartículas (nm). Em todos esses modelos, a exceção do modelo de Khanafer, a condutividade térmica da versão nanofluídica é expressa como uma função do tipo,  $f(\theta, k_{fb})$ , e  $k_{fb}$ , por sua vez, uma função da temperatura. Portanto, tais modelos resultam, em geral, do ajuste de curvas lineares ou quadráticas dos dados experimentais levantados para as amostras de nanofluido em estudo e, por esse motivo, os autores recomendam a aplicação de tais modelos a nanofluidos específicos.

Como pode ser observado na Figura 5.4, somente o modelo de Khanafer correlaciona satisfatoriamente os resultados experimentais para a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O ( $\theta = 0,24\%$ ). É importante ressaltar que no modelo de Khanafer, além da concentração volumétrica e da condutividade térmica do fluido base, aparecem a condutividade térmica das nanopartículas,  $k_p$ , e o diâmetro das nanopartículas,  $d_p$ . Assim, variando-se o diâmetro,  $d_p$ , no modelo de Khanafer, foi possível conseguir um desvio médio inferior a 1% em relação aos resultados experimentais.

### 5.3 Características Termo-hidráulicas

Da mesma forma que para as propriedades termofísicas os modelos conhecidos na literatura para a determinação do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos, também apresentam desvios elevados quando aplicados a nanofluidos.

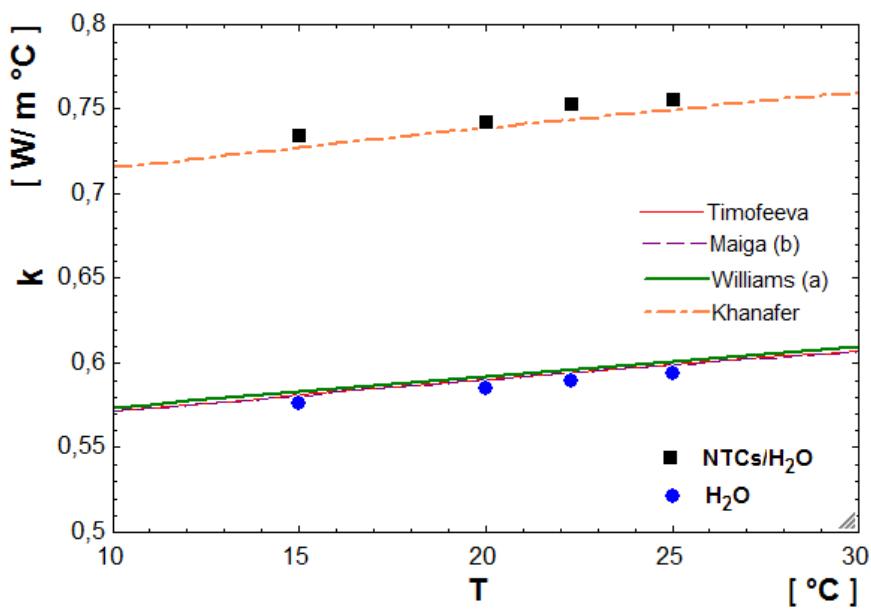


Figura 5.4 – Resultados experimentais para a condutividade térmica do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, ( $\theta = 0,24\%$ ), e da água destilada com a superposição das curvas das correlações especialmente desenvolvidas para nanofluidos.

Comprovadamente, os modelos clássicos subestimam o fator de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção e os resultados experimentais encontrados, em muitos casos, superam o efeito diretamente medido sobre a viscosidade e a condutividade térmica, respectivamente. Tal estado de coisas, leva a inferir que, ou a caracterização das propriedades via medição experimental não é precisa ou, os parâmetros envolvidos passaram a apresentar comportamentos distintos, alterando a influência de efeitos, agora significativos.

Basicamente, de acordo com o exposto anteriormente, os modelos existentes para a perda de carga e transferência de calor por convecção no escoamento de fluido no interior de tubos são desenvolvidos com base na velocidade de escoamento, na geometria do canal de escoamento e nas propriedades termofísicas do fluido. Estas, por sua vez, são fortemente dependentes da temperatura do fluido. Além disso, os principais grupos adimensionais, relacionados ao fator de atrito e ao coeficiente de transferência de calor por convecção, são o número de Reynolds e o número de Prandtl. Assim, sendo constantes as condições geométricas e para mesma vazão mássica, a aparente redução do número de Reynolds nas versões nanofluídicas, em princípio, é efeito exclusivo do aumento da viscosidade e, esta, por sua vez, dependente da temperatura e da concentração de nanopartículas na suspensão.

Até o presente momento, os nanofluidos têm sido preparados com baixas concentra-

ções em volume de nanopartículas e isto implica no fato de que as propriedades termofísicas do nanofluido, em função da temperatura, dependem, em grande parte, do comportamento da viscosidade do fluido base. Entretanto, além da concentração de nanopartículas na suspensão, o tamanho, a forma, a presença de aglomerados de nanopartículas, bem como, o tamanho e forma destes, podem afetar as propriedades termofísicas dos nanofluidos.

Em se tratando de nanofluidos, o parâmetro empregado em, praticamente, todos os modelos para a predição do fator de atrito e do coeficiente de transferência de calor, assim como naqueles desenvolvidos para a predição das propriedades termofísicas, tem sido a fração em volume de nanopartículas ( $\theta$ ).

A seguir, são apresentadas comparações dos resultados experimentais com correlações de transferência de calor e perda de carga disponíveis da literatura.

### 5.3.1 *Fator de atrito*

A abordagem mais frequentemente encontrada em estudos das características de fluxo de nanofluidos é a de que o nanofluido deve ser tratado como um meio homogêneo. Nesta abordagem tudo se passa como se a mistura bifásica (matriz fluida + nanopartículas) escoasse como um fluido homogêneo de propriedades médias entre as fases sólida e líquida, dependentes da concentração de nanopartículas em suspensão. Teoricamente, as nanopartículas estão uniformemente distribuídas e deslocando-se junto com as moléculas do fluido base. É interessante destacar que esse modelo é melhor aplicado quando se opera com vazões significativamente elevadas, onde o deslizamento entre as fases é menor.

Os resultados experimentais levantados para o fator de atrito do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O são confrontados com os valores previstos pelas correlações clássicas de Pethukov (Eq.(5.12)) e de Blasius (Eq.(5.13)). Diferentes modelos, especialmente, desenvolvidos para a predição do fator de atrito para escoamento de nanofluidos são encontrados na literatura, como exemplo, as correlações propostas por Sundar et al. (2012), Duangthongsuk e Wongwises (2010) e Vijjha et al. (2010), expressas pelas equações (5.14), (5.15) e (5.16), respectivamente.

$$f_P = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (5.12)$$

$$f_B = 0,316 Re^{-1/4} \quad (5.13)$$

$$f_{nf_S} = 0,349 Re^{-0,25} (1 + \theta)^{0,1571} \quad (5.14)$$

$$f_{nf_W} = 0,961 \theta^{0,052} Re^{-0,375} \quad (5.15)$$

$$f_{nf_V} = 0,3164 Re^{-0,25} \left( \frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}} \right) \left( \frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} \right) \quad (5.16)$$

onde,  $f_{nf_S}$ ,  $f_{nf_W}$  e  $f_{nf_V}$  é o coeficiente de atrito do nanofluido, segundo o modelo de Sundar, de Wongwises e de Vrijha respectivamente.  $\rho$  e  $\mu$  designam a massa específica e a viscosidade e os subscritos  $nf$  e  $fb$  referem-se ao nanofluido e ao fluido base respectivamente.  $\theta$  é a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão.

Na Figura 5.5 são ilustrados os resultados experimentais levantados para o fator de atrito do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, superpostos com a curvas relativas às correlações.

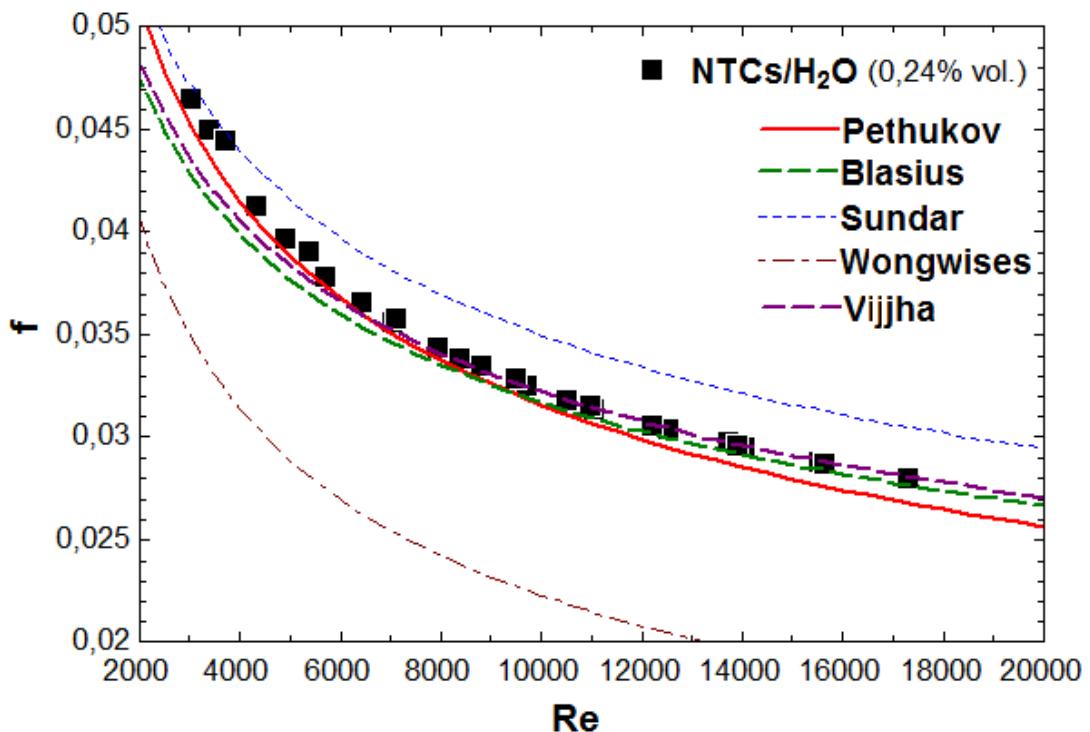


Figura 5.5 – Resultados experimentais para o fator de atrito do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, ( $\theta = 0,24\%$ ), com a superposição das curvas das correlações.

Conforme observado, o fator de atrito calculado pelo modelo de Sundar é em média 8,4% superior ao fator de atrito experimental. Por outro lado, o modelo de Wongwises resulta em valores, em média, 30% inferiores aos resultados experimentais. Por sua vez, as correlações de Vrijha, Petukhov e Blasius concordam, satisfatoriamente, com os resultados experimentais.

Cabe ressaltar que, neste caso, o número de Reynolds foi determinado a partir das propriedades termofísicas modificadas das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O ensaiadas.

Como pode ser observado na equação (5.16), o modelo de Vrijha contempla além das características de fluxo, por intermédio do número de Reynolds, também leva em consideração a massa específica e a viscosidade do nanofluido e do fluido base. Lembrando que a massa específica das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O foi definida a partir da regra da mistura (Eq. (4.2)) e que a viscosidade foi medida e encontrada para ser em média 16 % superior à da água destilada. É interessante observar, ainda, que o modelo de Vrijha foi o que melhor se ajustou aos resultados experimentais, com um desvio médio de 0,2 %.

Nota-se, também, que a diferença entre os resultados experimentais e aqueles calculados por intermédio das correlações aumenta com o número de Reynolds e com o incremento da temperatura. Isto está relacionado ao regime de escoamento turbulento, evidenciando que os modelos propostos não correlacionam satisfatoriamente nessa região. Entretanto, no caso das correlações de Petukhov (Eq. (5.12)) e Blasius (Eq. (5.13)), a primeira reproduz, com mais fidelidade, os resultados experimentais para escoamento com número de Reynolds entre 3.000 a 10.000, ao passo que a segunda, ajusta-se melhor aos resultados experimentais em escoamento com número de Reynolds acima de 10.000.

### 5.3.2 Coeficiente de transferência de calor

O aumento da condutividade térmica do fluido devido à adição de nanopartículas já foi confirmado por intermédio de diversos trabalhos na literatura, mesmo com resultados discrepantes. Entretanto, a condição necessária para a aplicação prática de nanofluidos irá advir de resultados concretos sobre o desempenho da transferência de calor por convecção. Portanto, assim como as questões relativas às propriedades termofísicas e ao comportamento de fluxo dos nanofluidos durante o escoamento, as questões relacionadas à transferência de calor devem ser melhor ou mesmo totalmente compreendidas.

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção para diferentes condições de escoamento e geometrias com diferentes nanofluidos. Em decorrência do elevado número de variáveis associadas com uma

condição qualquer de escoamento, assim como ocorre no estudo de fluidos puros, os pesquisadores desenvolvem correlações gerais em termos de parâmetros ou grupos adimensionais.

Em geral, tem sido proposto o número de Nusselt para nanofluidos como uma função, expressa por:

$$Nu_{nf} = f(Re_{nf}, Pr_{nf}, \theta) \quad (5.17)$$

Ao trabalharem com amostras de nanofluido magnético de  $Fe_3O_4$ /água, Sundar et al. (2012) também desenvolveram uma correlação para a predição do número de Nusselt de nanofluidos (Eq. (5.18)). Da mesma forma, Duangthongsuk e Wongwises (2010), estudaram amostras de nanofluidos de  $TiO_2$ /água, e propuseram uma nova correlação de transferência de calor (Eq. (5.19)), obtida por ajuste da curva de todos os seus resultados experimentais. A partir de experimentos com nanopartículas de óxido de alumínio, óxido de cobre e de dióxido de silício dispersas em misturas de etileno-glicol e água, Vijjha et al. (2010) também desenvolveram uma correlação para o coeficiente de transferência de calor de nanofluidos, como uma função das propriedades e da concentração volumétrica de nanopartículas (Eq. (5.20)).

$$Nu_{nf_S} = 0,02172 Re^{0,8} Pr^{0,5} (1 + \theta)^{0,5181}, \quad (5.18)$$

$$Nu_{nf_W} = 0,074 Re^{0,707} Pr^{0,385} \theta^{0,074}, \quad (5.19)$$

$$Nu_{nf_V} = 0,065(Re^{0,65} - 60,22)(1 + 0,0169 \theta^{0,15}) Pr^{0,542}. \quad (5.20)$$

Observa-se que as correlações propostas pelos autores supra-citados, foram, desenvolvidas com base na correlação de Gnielinski, (eq. ( 5.21)), diferindo apenas, por conterem um termo adicional que leva em consideração a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão.

$$Nu = 0,012(Re^{0,87} - 280) Pr^{0,4}. \quad (5.21)$$

Também figuram entre os modelos desenvolvidos para a predição do número de Nusselt de nanofluidos alguns modelos derivados a partir da correlação de Dittus-Boelter que, para o caso de aquecimento, é dada por pela Eq. (5.22). Como exemplos, tem-se os modelos propostos por

Pak e Cho (1999), e Maiga et al. (2006), dados pelas Eqs. (5.23) e (5.24), respectivamente.

$$Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^{0,4}, \quad (5.22)$$

$$Nu_{nf_{P-C}} = 0,021 Re_{nf}^{0,8} Pr_{nf}^{0,5}, \quad (5.23)$$

$$Nu_{nf_M} = 0,085 Re_{nf}^{0,71} Pr_{nf}^{0,35}. \quad (5.24)$$

Outras abordagens envolvendo alguns termos e parâmetros diferentes podem ser encontradas na literatura e, nestes casos, o número de Nusselt de um nanofluido é expresso como uma função do tipo;

$$Nu_{nf} = f \left( Re_{nf}, Pr_{nf}, \left( \frac{k_p}{k_{fb}} \right), \left( \frac{(\rho c_p)_p}{(\rho c_p)_{fb}} \right), \theta, \text{ tamanho e forma da particula} \right) \quad (5.25)$$

No referido modelo são considerados, segundo os autores, os efeitos microconvecção e microdifusão das nanopartículas em suspensão, resultando em correlações que, corretamente, levam em consideração os principais fatores que afetam a transferência de calor do nanofluido sendo expressas da seguinte forma:

$$Nu_{nf} = C_1 \left( 1,0 + C_2^{m_1} Pe_p^{m_2} \right) Re_{nf}^{m_3} Pr_{nf}^{0,4}. \quad (5.26)$$

Como exemplo desta abordagem, destaca-se o modelo desenvolvido por Xuan e Li (2003), válido para regime de escoamento com  $10.000 < Re < 22.500$  e concentração em volume de nanoparticula,  $0 < \theta < 1,5\%$ .

$$Nu_{nf_{X-L}} = 0,0059 \left[ 1 + 7,6286 \theta^{0,6886} \left( Re_{nf} Pr_{nf} \left( \frac{d_p}{D} \right) \right)^{0,001} \right] Re_{nf}^{0,9233} Pr_{nf}^{0,4} \quad (5.27)$$

Finalmente, entre as correlações escolhidas para a comparação com os resultados experimentais do presente estudo, aparece a correlação proposta por ASIRVATHAM ET AL, 2011).

$$Nu_{nf_A} = 0,0023 Re_{nf}^{0,8} Pr_{nf}^{0,3} + (0,617\theta - 0,135) Re_{nf}^{(0,445\theta - 0,37)} Pr_{nf}^{(1,081\theta - 1,305)}, \quad (5.28)$$

Nas figuras subsequentes, são apresentados os resultados experimentais levantados para o coeficiente de transferência de calor, obtidos nos ensaios das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, ( $\theta = 0,24\%$ ), para diferentes condições de vazão mássica, temperatura de entrada e fluxo específico de calor pela parede, com a superposição das curvas características das correlações expressas pelas equações (5.18) até (5.28).

A Figura 5.6 ilustra os resultados experimentais com a superposição da correlação de Gnielinski (Eq. (5.21)) e das correlações de Sundar, Wongwises e Vijjha dadas, respectivamente, pelas Eqs. (5.18), (5.19) e (5.20) todas derivadas a partir da correlação clássica de Gnielinski e caracterizadas como funções do tipo aquela expressa na Eq. (5.17) ( $Nu = f(Re_{nf}, Pr_{nf}, \theta)$ ). Onde  $\theta$  é a concentração volumétrica de nanopartículas na suspensão e os números de Reynolds e Prandtl são calculados a partir das propriedades modificadas dos nanofluidos e, estas, por sua vez, caracterizadas por medição e ajustadas em função de uma temperatura de referência, no caso a temperatura média do fluido entre a entrada e a saída da seção de teste durante o referido ensaio.

É possível observar que a correlação clássica de Gnielinski reproduz bem, com um desvio médio de 9,2%, em relação aos resultados experimentais levantados para o número de Nusselt das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O. Observa-se, ainda, que este desvio tende a aumentar com o aumento da temperatura do ensaio e, claramente, diminui com o incremento da vazão mássica do fluido (aumento do número de Reynolds). Em relação aos novos modelos, especialmente desenvolvidos para nanofluidos, observa-se que a correlação proposta por Sundar superestima o número de Nusselt com um desvio médio superior a 22,4%. Os valores previstos pela correlação de Wongwises apresentaram um desvio médio de 7,8% em relação aos resultados experimentais. Entretanto, verifica-se que para números de Reynolds inferiores ( $2.000 < Re < 6.000$ ), o modelo superestima o número de Nusselt e, para números de Reynolds superiores ( $7.000 < Re < 20.000$ ) o modelo subestima os resultados experimentais. Vale destacar, ainda, que o modelo de Vijjha segue o mesmo comportamento do modelo de Wongwises, isto é, para

escoamento com número de Reynolds menores a correlação de Vrijha superestima o número de Nusselt do nanofluido e, para números de Reynolds elevados, a previsão do  $Nu$  subestima os resultados experimentais. Porém, de um modo geral, a correlação de Vrijha proporciona um desvio médio de 15,4% em relação aos resultados experimentais.

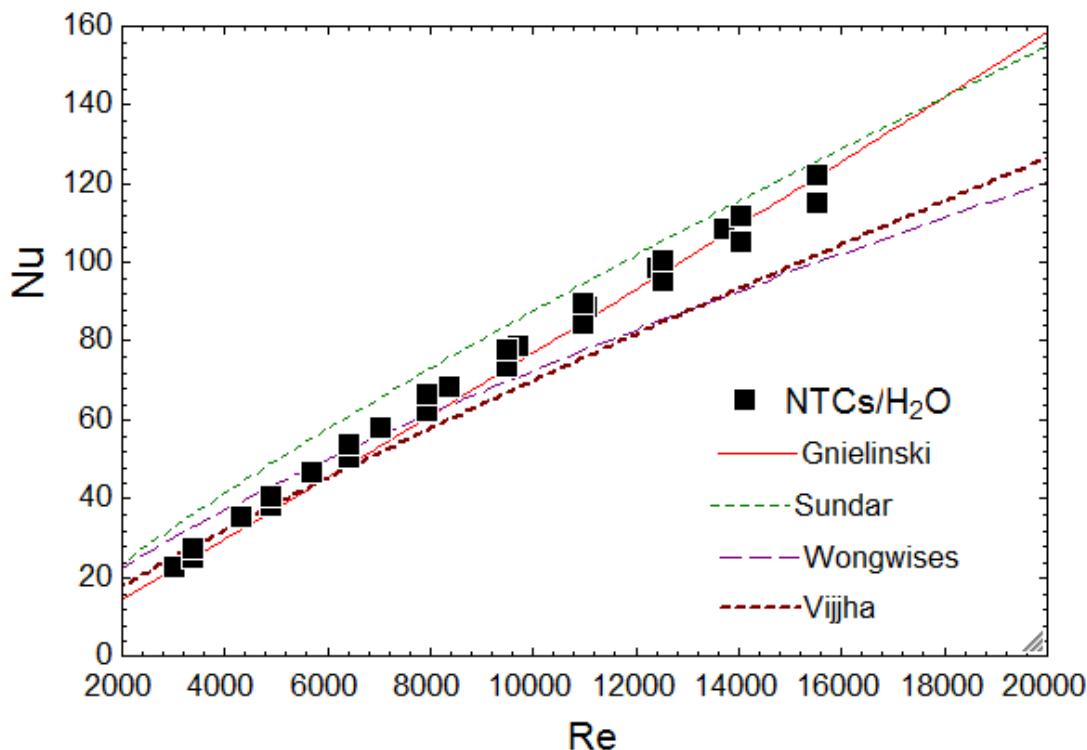


Figura 5.6 – Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Gnielinski, Sundar, Wongwises e Vrijha.

Os modelos propostos por Pak e Cho (1999) e Maiga et al. (2006), fundamentam-se na correlação clássica de Dittus-Boelter (Eq. (5.22)).

A Figura 5.7 ilustra os resultados experimentais e as curvas características das correlações de Dittus-Boelter, Pak e Cho e de Maiga.

Observa-se que a correlação clássica de Dittus-Boelter apresenta um desvio médio de 6,1% em relação aos resultados experimentais, entretanto, varia na faixa entre -39,5 e 9,6%. A correlação de Pak e Cho, como pode ser observado na Fig. 5.7, acompanha a tendência dos resultados experimentais, porém, com um desvio médio de 18,2%. O modelo desenvolvido por Maiga et al. (2006) não consegue prever os resultados experimentais e nas condições específicas do presente estudo, a correlação de Maiga superestima o número de Nusselt apresentando um desvio médio superior a 58,6%.

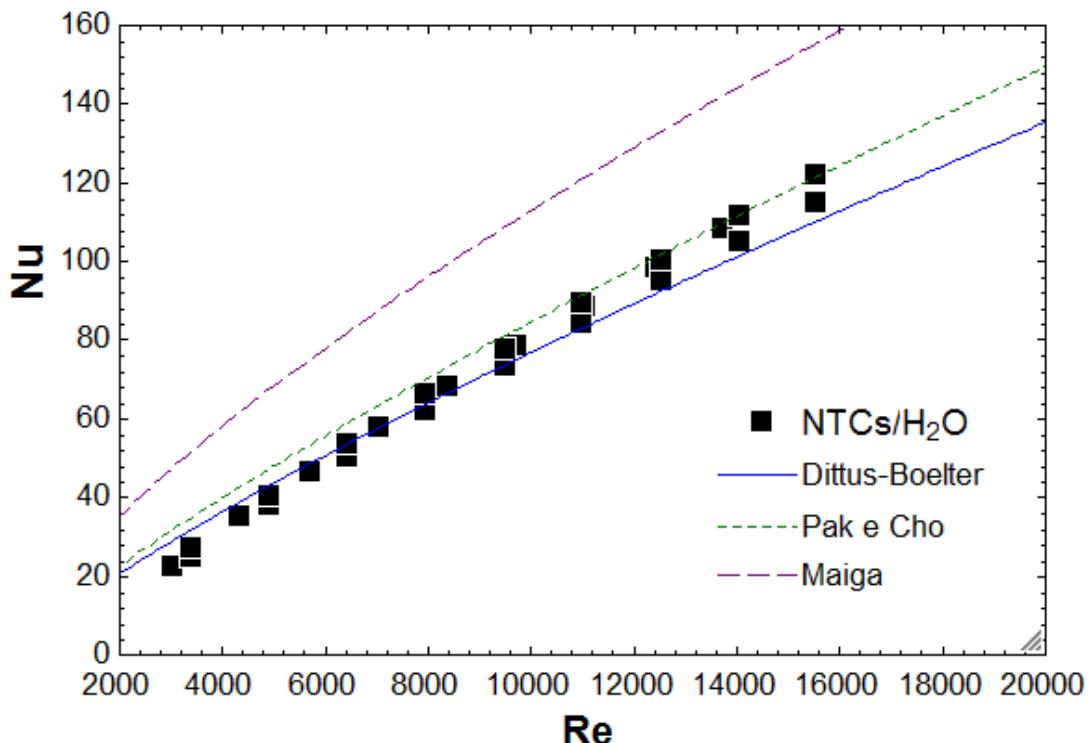


Figura 5.7 – Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Dittus-Boelter, Pak e Cho e Maiga.

A Figura 5.8 apresenta os resultados experimentais em superposição com as curvas características das correlações clássicas de Gnielinski, Dittus-Boelter, além das curvas relativas aos modelos de Xuan e Li (XUAN E LI, 2003), e de Asirvatham (ASIRVATHAM *ET AL*, 2011) expressos pelas Eqs. (5.27) e (5.28), respectivamente.

Como mencionado anteriormente, estes modelos derivam de abordagens diferentes e pretendem levar em consideração os efeitos de microconvecção e microdifusão das nanopartículas suspensas. Na Eq. (5.27), que expressa a correlação desenvolvida por Xuan e Li, o diâmetro da partícula  $d_p$  é o parâmetro que se destaca, uma vez que, em nenhum outro modelo ele aparece. Por sua vez, na correlação desenvolvida por Asirvatham, a concentração em volume de nanopartículas é o parâmetro que ganha destaque.

Como pode ser observado, a correlação de Xuan e Li concorda satisfatoriamente com os resultados experimentais e o desvio médio foi de 7,5 %. A previsão resultante da correlação de Asirvatham, entretanto, apresenta um desvio médio de 13 % em relação aos resultados experimentais e a diferença entre os valores calculados pela correlação e os resultados experimentais aumenta com o incremento do número de Reynolds do escoamento.

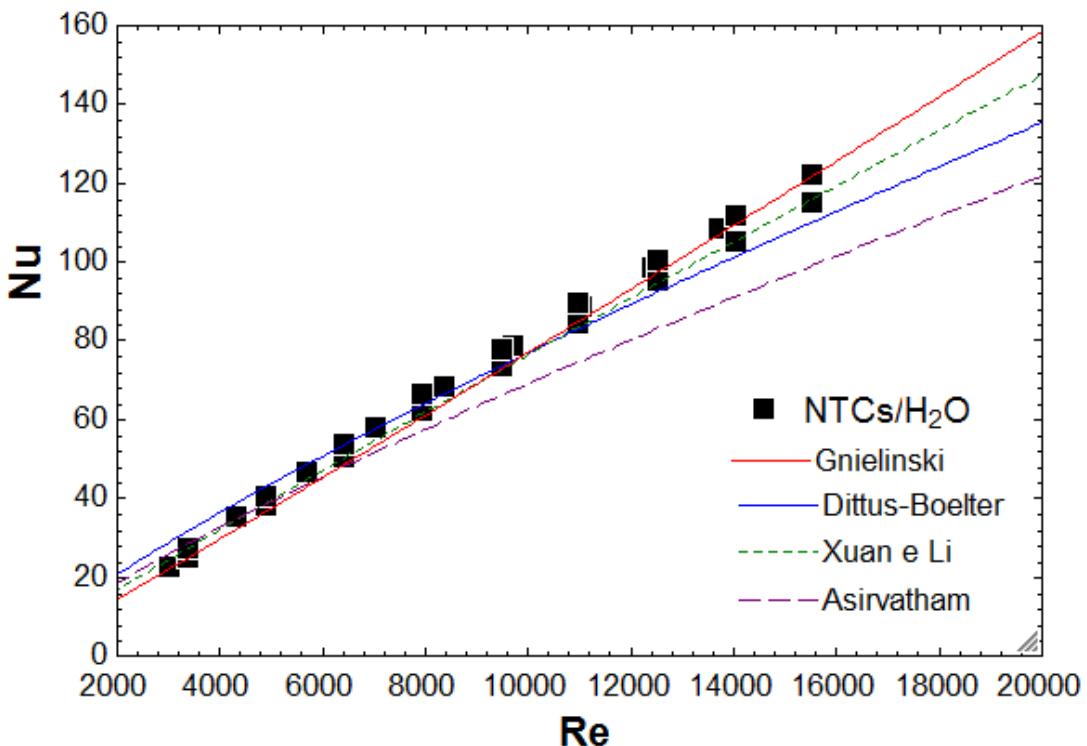


Figura 5.8 – Resultados experimentais superpostos com as curvas características das correlações de Gnielinski, Dittus-Boelter, Xuan e Li e Asirvatham.

Nos gráficos das Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, foram comparados os resultados experimentais para o número de Nusselt com os valores previstos pelas principais correlações disponíveis na bibliografia. Neste sentido, foram escolhidas as correlações cujos parâmetros envolvidos e as condições de escoamento fossem aqueles monitorados na presente pesquisa. Assim, os modelos escolhidos são válidos para escoamento em regime de transição e turbulento, as propriedades termofísicas do nanofluido são consideradas em função da temperatura de ensaio e da fração em volume de nanopartículas na suspensão.

Com o objetivo de organizar as comparações e facilitar a visualização gráfica, as correlações foram separadas em função da principal abordagem adotada pelos autores durante o desenvolvimento das mesmas. Basicamente, os modelos empregados no desenvolvimento das correlações para o número de Nusselt de nanofluidos seguem as estruturas das Eqs. (5.17), (5.25) e (5.26) e são derivadas a partir dos modelos clássicos de Gnielinski ou de Dittus-Boelter.

Como mencionado anteriormente, as amostras de nanofluido NT01, NT03, NT04 e NT05 foram preparadas com concentração em volume de nanotubos de 0,24 %, porém, a partir de nanotubos de carbono de diferentes espécimes. Assim, para uma primeira aproximação,

os resultados experimentais foram resumidos de modo que o coeficiente de transferência de calor resulta da média dos ensaios de todas as amostras considerando as temperaturas de entrada de 10, 15 e 20 °C.

A Tabela 5.1 apresenta os desvios médios, proporcionados pelas referidas correlações em relação aos resultados experimentais.

Tabela 5.1 – Desvios médios proporcionados pelas correlações em relação aos resultados experimentais do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com concentração volumétrica de 0,24 %.

Correlação	Desvio Médio	Modelo	Autor(es) / [Referência]
Eq. (5.21)	9,2 %	Gnielinski	
Eq. (5.22)	6,1 %	Dittus-Boelter	
Eq. (5.18)	22,4 %	Sundar	(SUNDAR <i>ET AL</i> , 2012)
Eq. (5.19)	7,8 %	Wongwises	(DUANGTHONGSUK E WONGWISES, 2010)
Eq. (5.20)	15,4 %	Vijjha	(VIJJHA <i>ET AL</i> , 2010)
Eq. (5.23)	18,2 %	Pak e Cho	(PAK E CHO, 1999)
Eq. (5.24)	58,6 %	Maiga	(MAIGA <i>ET AL</i> , 2006)
Eq. (5.27)	7,5 %	Xuan e Li	(XUAN E LI, 2003)
Eq. (5.28)	13 %	Asirvathan	(ASIRVATHAM <i>ET AL</i> , 2011)
Eq. (5.29)	4,6 %		<b>Presente estudo</b>

#### 5.4 Correlação para Número de Nusselt

Nesta seção, será apresentado o procedimento utilizado no desenvolvimento de uma correlação para a predição do número de Nusselt que caracterize os resultados experimentais obtidos no presente trabalho. A escolha dos parâmetros que compõem o modelo, desenvolvido no presente estudo, segue a tendência geral de outros modelos encontrados na literatura, isto é, segue a estrutura expressa pela Eq. (5.17). Assim, de acordo com o exposto no capítulo anterior, o modelo para a transferência de calor de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O foi desenvolvido para uma faixa de velocidade mássica entre 600 kg/s.m<sup>2</sup> e 3200 kg/s.m<sup>2</sup>. Dada a geometria do tubo da seção de teste e as propriedades das amostras de nanofluido ensaiadas, tanto o número de Reynolds quanto o número de Prandt foram determinados como funções da concentração em volume de nanopartículas na suspensão e da temperatura média do fluido na seção de testes, isto é, as propriedades termofísicas das amostras de NTCs/H<sub>2</sub>O e, consequentemente, os adimensionais *Re* e *Pr* são expressos na forma  $f(\theta, T)$ , onde  $\theta$  é a concentração em volume de nanopartículas e

$T$  é a temperatura média do fluido (temperatura de referência para as propriedades termofísicas).

Como mencionado anteriormente, a maioria das correlações só reproduz, satisfatoriamente, os resultados experimentais específicos do nanofluido referente ao próprio estudo em questão. Assim, o comportamento das principais correlações para a predição do coeficiente de transferência de calor de nanofluidos em relação aos resultados experimentais do presente estudo pode ser observado nas Figs. 5.6, 5.7 e 5.8 e os elevados desvios, anotados na Tabela 5.1, motivaram o desenvolvimento de um modelo para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção para nanofluidos em escoamento no interior de tubo circular reto e horizontal, válido para os regimes de transição e turbulento.

A Figura 5.9 ilustra a comparação de resultados experimentais com a correlação desenvolvida durante o presente estudo. Como pode ser observado, o modelo proposto correlaciona de forma bastante satisfatória os resultados experimentais com um desvio médio de 4,6 %.

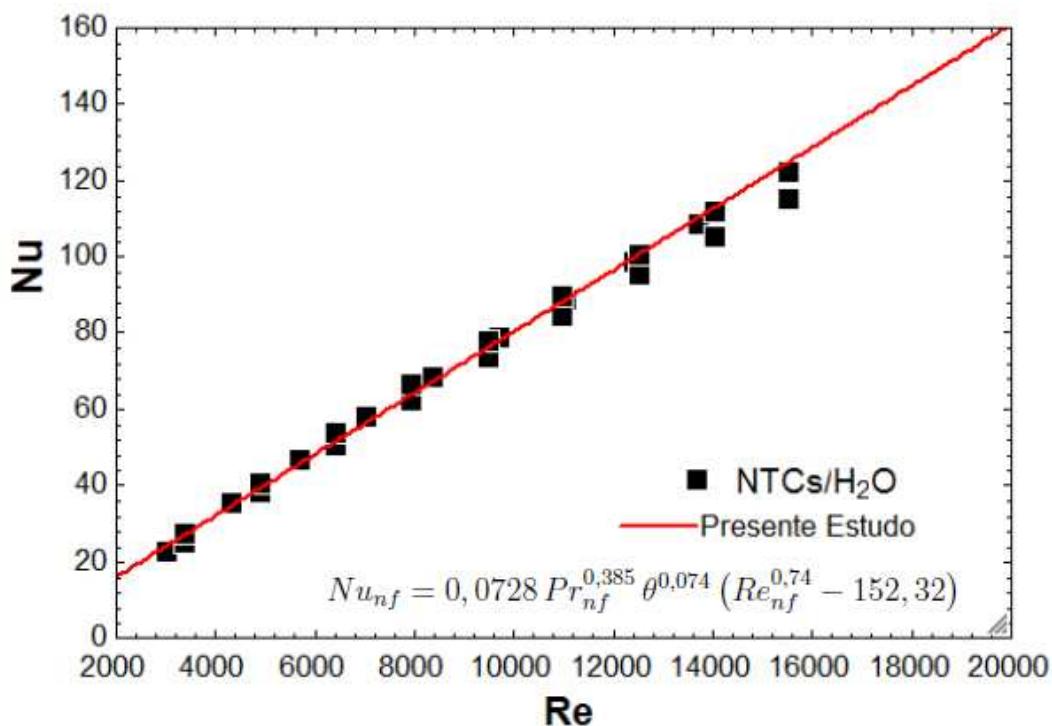


Figura 5.9 – Correlação dos resultados experimentais para nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O com concentração volumétrica de 0,24 %.

O modelo desenvolvido é baseado em parâmetros adimensionais como os números de Reynolds e Prandtl, além de incorporar a fração em volume de nanopartículas em suspensão, ou seja, o coeficiente adimensional de transferência de calor segue os moldes da Eq. (5.17) e resulta na seguinte expressão:

$$Nu_{nf} = 0,0728 Pr_{nf}^{0,385} \theta^{0,074} (Re_{nf}^{0,74} - 152,32) \quad (5.29)$$

Como pode ser observado, a estrutura da correlação proposta é bastante semelhante às correlações apresentadas por Vijjha, Wongwises e Asirvatham em que, os adimensionais Reynolds e Prandtl desempenham papel importante. Por sua vez, as propriedades termofísicas encerram efeitos significativos sobre o número de Reynolds e de Prandtl. Dessa forma, a correlação proposta depende, implicitamente, da concentração de nanopartículas, da química do fluido base e da temperatura do processo.

A Figura 5.10 ilustra a comparação da correlação proposta, (Eq. (5.29)), com os resultados experimentais relativos ao coeficiente adimensional de transferência de calor das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O com concentração volumétrica de 0,24 % em diferentes condições de ensaio. Também foram sobrepostas a linhas de referência com a variação de  $\pm 10\%$  do valor previsto pela presente correlação.

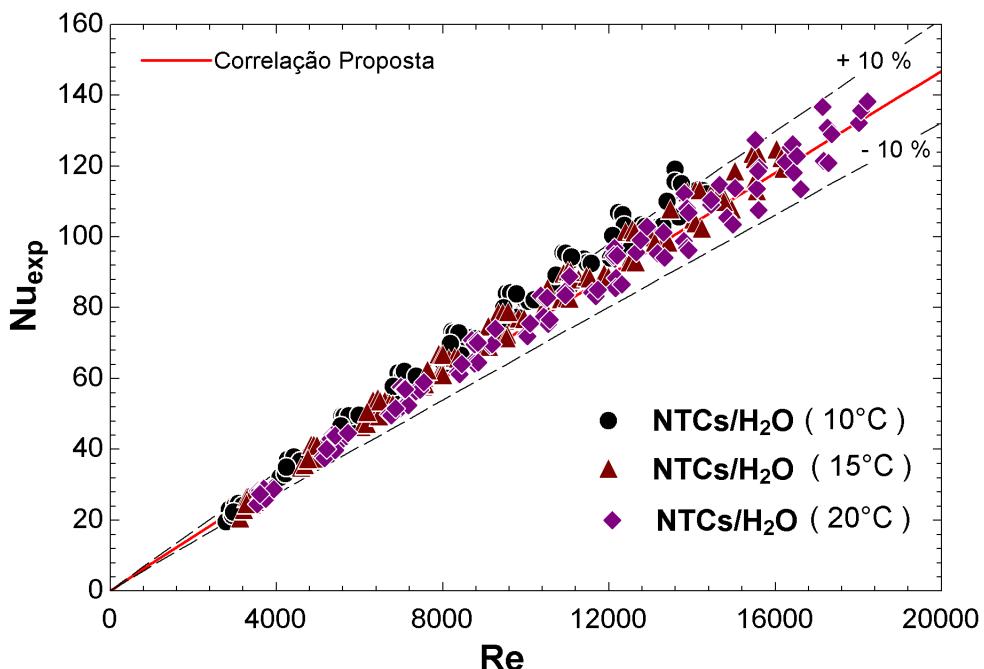


Figura 5.10 – Comparação da correlação proposta, Eq. (5.29), com resultados experimentais do número de Nusselt das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O ensaiadas em diferentes temperaturas de entrada.

É interessante observar que quanto maior a temperatura do nanofluido menor o desvio proporcionado e que, praticamente, 100 % dos resultados experimentais para temperatura de

20 °C estão dentro da faixa de  $\pm 10\%$ .

A Figura 5.11 ilustra a comparação dos resultados experimentais com os valores do coeficiente de transferência de calor, ( $h_{Corr}$ ), calculados a partir do Nusselt da correlação proposta, (Eq. (5.29)), de acordo com:

$$h_{Corr} = \frac{Nu_{Corr} D}{k_{nf}} \quad (5.30)$$

onde  $D$  é o diâmetro do tubo da seção de teste e  $k_{nf}$  é a condutividade térmica do nanofluido tomada na temperatura de referência, isto é, a temperatura média do nanofluido entre a entrada e a saída de seção de teste.

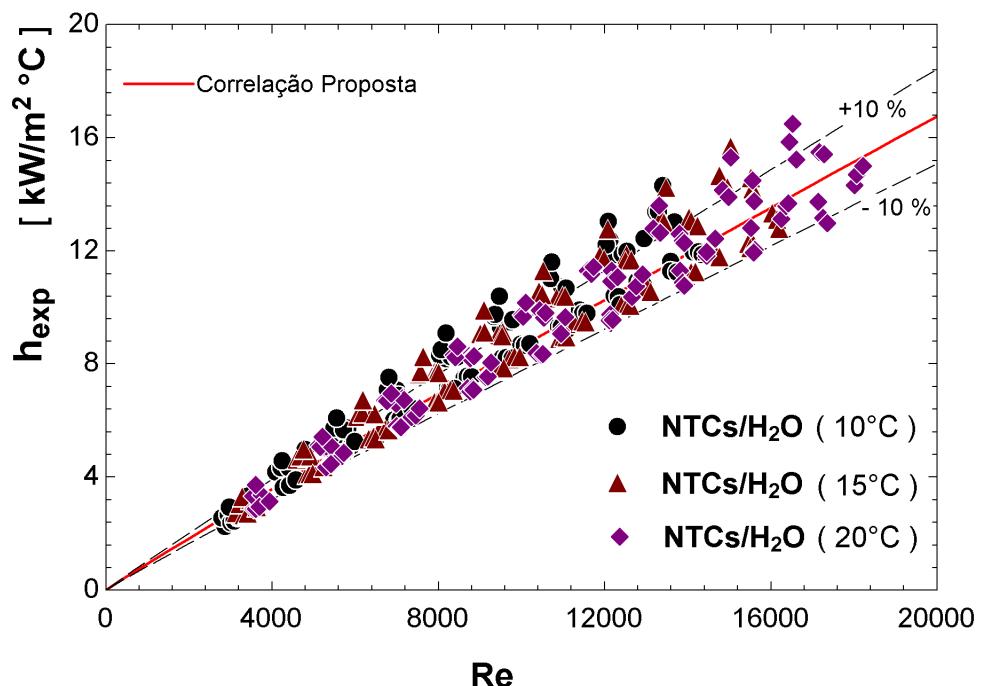


Figura 5.11 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção com a Eq. (5.30), a partir dos Nusselt da correlação proposta.

É importante ressaltar que devido à grande quantidade de parâmetros empregados nos ensaios, como anteriormente mencionado, a curva representativa da correlação resulta da média entre os valores encontrados para as diferentes condições de ensaio, devido à variações no número de Reynolds e no número de Prandtl, em função da temperatura do processo. Entretanto, o desvio médio encontrado em relação ao Nusselt e ao coeficiente de transferência de calor foi de apenas 2,9% quando avaliado para cada condição de ensaio.

#### 5.4.1 A correlação e alguns ensaios específicos

As Figuras 5.12 a 5.16 ilustram os resultados experimentais de alguns ensaios específicos, superpostos com os valores previstos pelas correlações de Wongwises (Eq. (5.19)), Vijha (Eq. 5.20)), Asirvatham (Eq. (5.28)) e a do presente estudo (Eq. (5.29)) e, como pode ser observado, a correlação proposta no presente estudo, como era de se esperar, é a que melhor representa os resultados experimentais do presente estudo. O desvio médio proporcionado por cada correlação, assim como, os dados sobre a amostra e as condições de ensaio que produziram os respectivos resultados estão contidos nas figuras.

A Figura 5.12 ilustra os resultados experimentais levantados para o número de Nusselt da amostra NT01 em ensaio específico com temperatura de entrada de  $10^{\circ}\text{C}$ , fluxo específico de calor pela parede do tubo da ST de  $10 \text{ kW/m}^2$  e vazão mássica variando de 20 a  $100 \text{ g/s}$ . Observa-se que o desvio médio entre os valores determinados pela correlação e aos resultados experimentais da amostra NT01 é de apenas 2,4 %. Vale lembrar que o coeficiente de transferência de calor da amostra NT01, preparada pela diluição de uma solução concentrada de nanotubos de carbono em água (3 %), foi em média 13,7 % superior ao da água destilada.

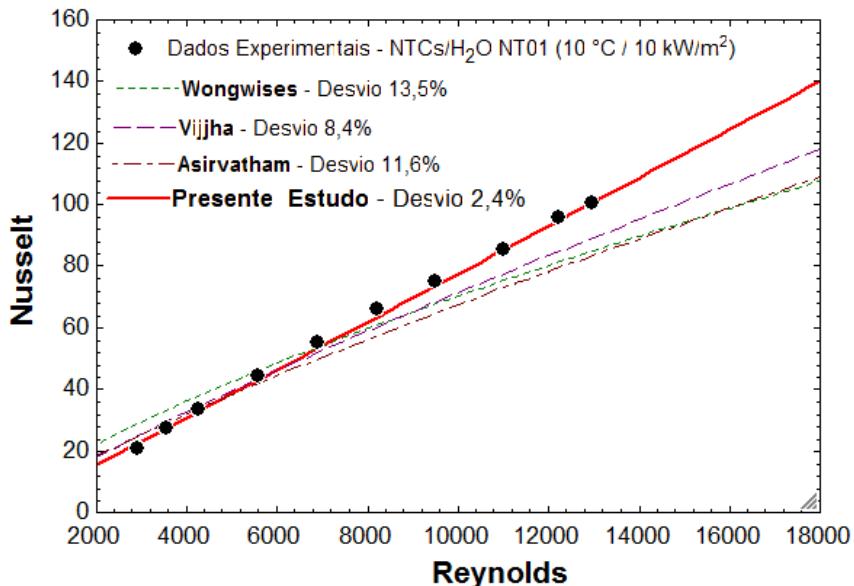


Figura 5.12 – Resultados experimentais da amostra NT01, ( $T_{ent} = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{for} = 10 \text{ kW/m}^2$  e  $\dot{m}$  variando de 20 a  $100 \text{ g/s}$ , com incremento de  $10 \text{ g/s}$ ), em superposição com as curvas das correlações.

A Figura 5.13 ilustra os resultados experimentais do ensaio realizado com a amostra NT02.

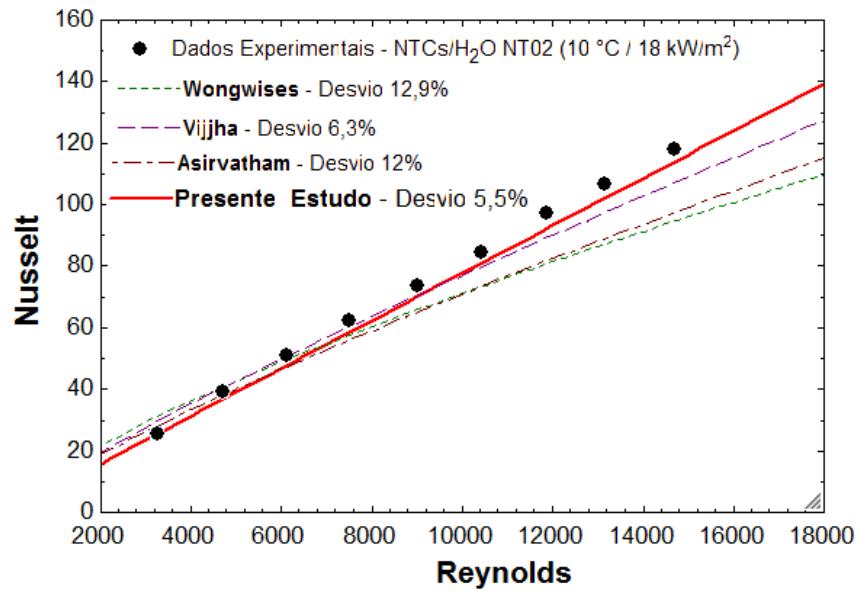


Figura 5.13 – Resultados experimentais da amostra NT02 ( $T_{ent} = 10^\circ C$ ,  $Q_{for} = 18 \text{ kW/m}^2$  e  $\dot{m} = 20 \rightarrow 100 \text{ g/s}$ ), em superposição com as curvas das correlações.

Na Figura 5.14 estão representados os resultados experimentais da amostra NT03.

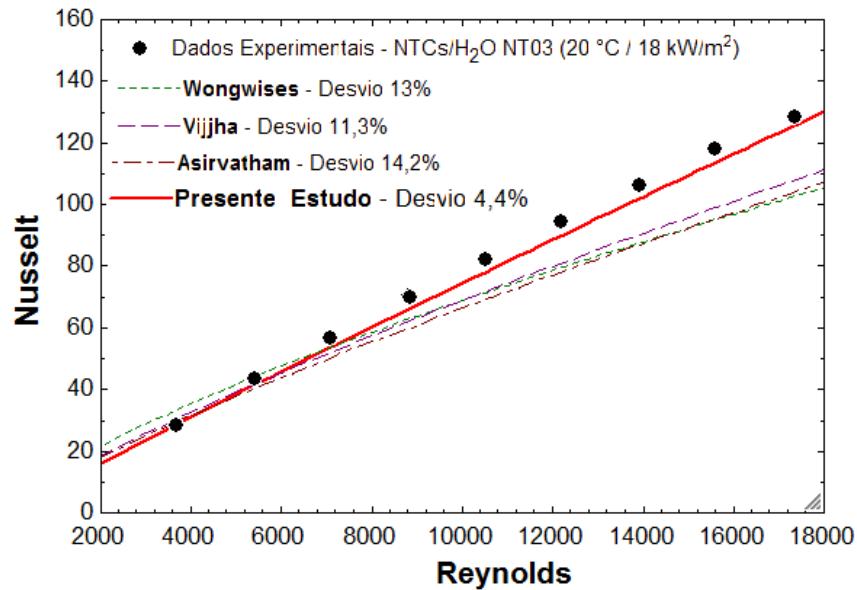


Figura 5.14 – Resultados experimentais para a amostra NT03/(0, 24%).

A figura 5.15 ilustra os resultados experimentais levantados a partir do ensaios realizados segundo as condições de temperatura de entrada ( $T_{ent}$ ), fluxo específico de calor pela parede ( $Q_{for}$ ), respectivamente iguais à  $10^{\circ}C$  e  $14\text{ kW/m}^2$  com vazão mássica ( $\dot{m}$ ), variando na faixa de 20 a  $100\text{ g/s}$  para o escoamento da amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT04, cuja concentração em volume de nanotubos de carbono na suspensão foi de 0,24%.

É interessante observar que os resultados proporcionados pela correlação desenvolvida no presente estudo, (Eq. (5.29)), correlaciona muito bem os resultados levantados para o coeficiente de transferência de calor da amostra NT04. Pode ser observado no gráfico da Fig. 5.15 que o desvio médio entre os valores previstos pela correlação e os resultados experimentais é de apenas 1,4%. Entretanto, é notável a discrepância entre os resultados proporcionados pelas correlações de Wongwises, Vijjha e Asirvatham, também sobrepostas no gráfico da Fig. 5.15.

Vale lembrar que, conforme os resultados experimentais apresentados no capítulo anterior (Seção 4.5.2), mais especificamente no gráfico da Fig. 4.30 (a) o aumento do coeficiente de transferência de calor da amostra NT04, em relação à água destilada foi de 5,7% quando a comparação é feita em termos da mesma velocidade mássica,  $G$ .

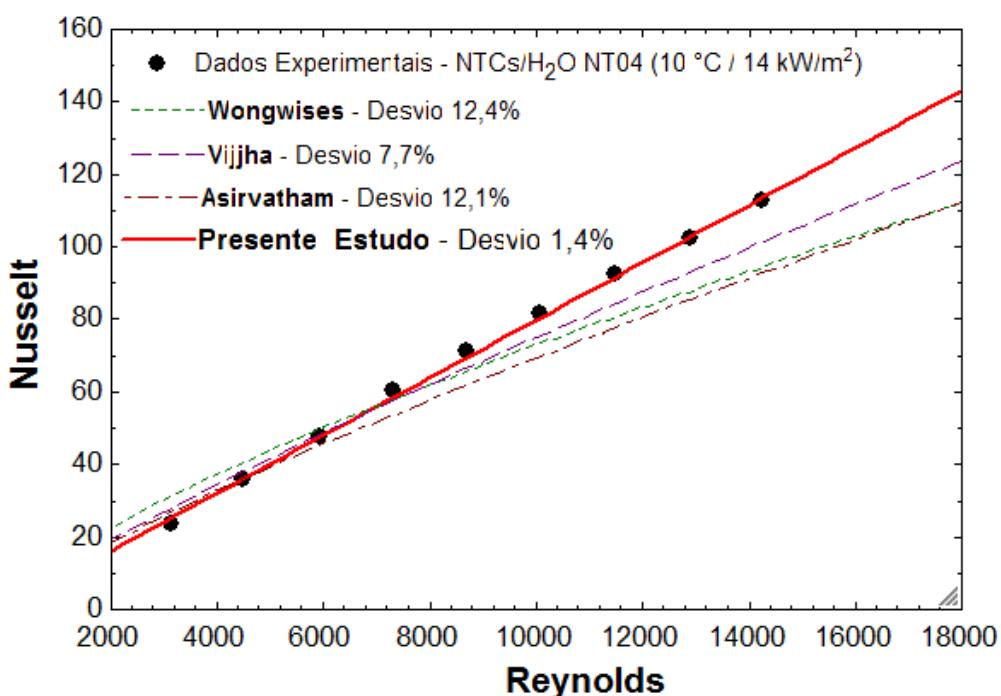


Figura 5.15 – Comparação dos resultados experimentais com a correlação proposta no presente estudo e com as correlações de Wongwises, Vijjha e Asirvatham.

Os resultados do ensaio da amostra NT05 com  $T_{ent} = 15^{\circ}C$ ,  $Q_{for} = 14\text{ kW/m}^2$  e

vazão mássica variando de 20 a 100 g/s, são ilustrados na Fig. 5.16 em superposição com as curvas proporcionadas pelas diferentes correlações.

Como observado na Fig. 5.16, os resultados são bem correlacionados pelo modelo proposto, Eq. (5.29), apresentando um desvio médio de 3,5%, o que corrobora a precisão da correlação desenvolvida a partir dos resultados experimentais do presente estudo.

Vale lembrar que a amostra de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O, NT05, foi produzida apartir da dispersão de nanotubos de carbono na forma de pó (assim como produzidos) e, conforme os resultados experimentais descritos no capítulo anterior (Seção 4.5.2), a referida amostra apresentou aumento de 17,5% no coeficiente de transferência de calor, em relação à água destilada, conforme pode ser observado no gráfico da Fig. 4.31.

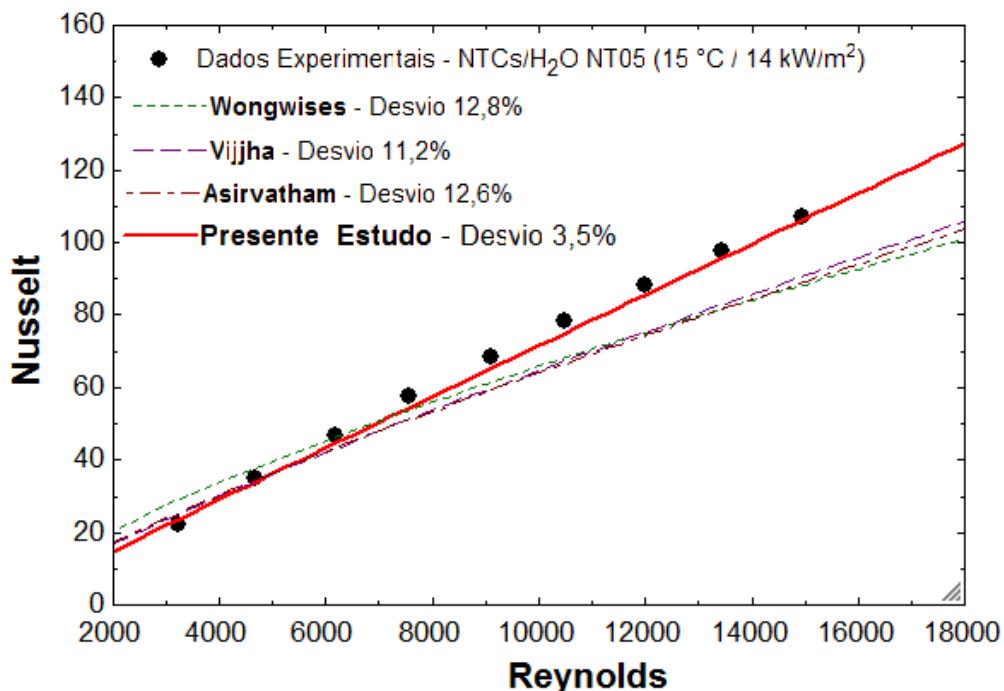


Figura 5.16 – Comparação dos resultados experimentais com a correlação proposta pelo presente estudo e com as correlações de Wongwises, Vijjha e Asirvatham.

Como pode ser observado nas figuras precedentes a correlação proposta reproduz de maneira satisfatória os resultados experimentais, com desvio máximo inferior aos proporcionados por outras correlações disponíveis na literatura. Considerando que a correlação desenvolvida no presente estudo correlaciona bem os resultados experimentais tanto para a média dos resultados levantados para as amostras com concentração volumétrica de 0,24% (Fig 5.10), quanto para os resultados de ensaios específicos das diferentes amostras e em diferentes condições de ensaio

(Fig 5.12 a 5.16) conclui-se que a correlação é sensível aos parâmetros considerados, isto é, a concentração volumétrica  $\theta$  e os adimensionais  $Re$  e  $Pr$ . Além disso, no presente estudo, como mencionado anteriormente, os adimensionais  $Re$  e  $Pr$  foram determinados a partir das propriedades termofísicas modificadas. Assim, a correlação expressa pela Eq. (5.29) pode ser aplicada na determinação do coeficiente de transferência de calor de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O, principalmente na faixa de operação realizada no presente trabalho.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões

A ampla revisão bibliográfica, que abrangeu desde o desenvolvimento histórico da nanociência e das nanotecnologias, relativas à síntese de nanopartículas até a aplicação destas no preparo de suspensões coloidais estáveis, contribuiu para o melhor entendimento do conceito de nanofluido. O conhecimento das técnicas de preparação, avaliação da homogeneidade, da estabilidade e caracterização das propriedades termofísicas, permitiu um melhor entendimento dos mecanismos físicos, supostamente, associados ao acréscimo na transferência de calor dos nanofluidos que tem sido amplamente publicado.

Um equipamento experimental capaz de determinar o coeficiente de transferência de calor e o fator de atrito do escoamento monofásico de nanofluidos em um tubo circular foi idealizado e construído. Com base nos resultados experimentais, foi possível assegurar que o equipamento experimental permitiu a aquisição de dados confiáveis. No presente trabalho foi utilizado um homogeneizador de alta pressão e, especialmente, para a amostra preparada a partir de nanotubos de carbono na forma de pó e assim como produzidos, foi utilizada, inicialmente, a sonicação para a dispersão e em seguida a amostra foi submetida ao processo de homogeneização por alta pressão, demonstrando ser o melhor processo para a dispersão das nanopartículas. De modo geral, os objetivos propostos para este trabalho foram plenamente alcançados. O coeficiente de transferência de calor e a perda de carga envolvida no escoamento nas regiões de transição

e turbulenta de nanofluidos de nanotubos de carbono a base de água foram investigados neste trabalho. A vazão mássica variou de aproximadamente 20 até 100  $g/s$ , o fluxo específico de calor foi mantido constante em 10, 14 e  $18 \text{ kW/m}^2$ , respectivamente, e as temperaturas de entrada em 10, 15 e  $20^\circ\text{C}$ . A análise dos dados experimentais adquiridos permitiu, de maneira satisfatória, avaliar o comportamento termo-hidráulico das amostras de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O e as principais conclusões relativas à presente pesquisa são podem ser resumidas nos seguintes itens:

- \* Muito embora nenhuma análise quantitativa relativa à estabilidade, homogeneidade e distribuição do tamanho dos aglomerados de nanotubos de carbono tenha sido realizada, a técnica de dois passos empregada na preparação das amostras, mostrou-se satisfatória para a preparação de suspensões de nanotubos de carbono, uma vez que, os aspectos referentes a dispersão, homogeneidade e estabilidade de suspensões de nanotubos de carbono em água foram analisados qualitativamente e permaneceram estáveis após 6 meses.
- \* A viscosidade e a condutividade térmica das amostras de nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O foram determinadas experimentalmente, indicando um incremento na condutividade térmica de 23 %, em média, e a viscosidade apresentou um aumento médio de 15 % em relação ao fluido base.
- \* Os modelos clássicos para a predição da condutividade e viscosidade de suspensões nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O apresentaram desvios elevados em relação aos dados experimentais. Vale destacar que o modelo proposto por Williams et al. (2008) para a viscosidade foi o que melhor correlacionou os resultados experimentais do presente estudo.
- \* O coeficiente de transferência de calor do nanofluido de NTCs/H<sub>2</sub>O aumentou, em média, 7,1 %, em relação à água. A comparação do acréscimo da condutividade térmica (23 %) com o incremento do coeficiente de transferência de calor (7,1 %) mostra, claramente, que o acréscimo da condutividade térmica não se refletiu, integralmente, no coeficiente de transferência de calor, quando a análise é realizada em termos da mesma velocidade mássica. Da mesma forma o aumento da viscosidade da versão nanofluídica (15 %) não produziu acréscimo proporcional no fator de atrito que, foi encontrado, em média, 9,8 % superior ao da água destilada.

- \* A velocidade mássica variou de 600 e  $3200 \text{ kg/s.m}^2$  e verificou-se que afeta de forma significativa o coeficiente de transferência de calor. Os resultados mostraram que a medida que a velocidade mássica é aumentada, o coeficiente de transferência de calor teve seu valor incrementado.
- \* Apesar da estreita faixa de temperaturas ensaiadas (entre 10 e  $20^\circ\text{C}$ ), verificou-se, assim como no caso da vazão mássica, que a temperatura do fluido afeta o coeficiente de transferência de calor. O efeito da temperatura sobre o coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos foi mais evidente quando a comparação foi realizada em termos do número de Reynolds.
- \* Observou-se que os efeito do fluxo específico de calor sobre o coeficiente de transferência de calor não foi significativo, uma vez que o aumento do coeficiente do nanofluido em relação ao da água não apresentou uma tendência clara e regular.
- \* O efeito da razão de aspecto foi investigado e amostras foram preparadas com concentração de 0,5% em massa com nanotubos de diferentes razões de aspecto. O nanofluido preparado com nanotubos de carbono de maior razão de aspecto (amostra NT04 ( $r = 2400$ )) apresentou um acréscimo, em média, de 7,4% no coeficiente de transferência de calor em relação à amostra produzida com nanotubos de carbono de razão de aspecto reduzida (amostra NT03 ( $r = 100$ )).
- \* Os nanotubos de carbono facilmente dispersíveis foram utilizados para preparar as amostras NT02 e NT04 com concentração de 0,25 e 0,50% em massa, respectivamente. Como observado, o aumento da fração de nanotubos resultou no acréscimo do coeficiente de transferência de calor do nanofluido, evidenciando o efeito da concentração das nanopartículas.
- \* Verificou-se que para uma concentração de 0,24% em volume de nanotubos de carbono em água, o coeficiente de transferência de calor apresentou um aumento médio de 8,6% em relação ao fluido base, para a mesma velocidade mássica. No entanto, durante os ensaios foi detectado um aumento de 8,8% relativo à perda de carga.

\* O modelo desenvolvido para a determinação do coeficiente de transferência de calor para nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O correlacionou de forma bastante satisfatória os resultados experimentais apresentados pelo presente trabalho, apresentando um desvio médio de 2,9 %. Além disso, 95 % dos dados se encontram dentro da faixa de  $\pm 10\%$ . Vale ressaltar que a correlação proposta é válida para os regimes de escoamento em transição e turbulento.

## 6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

O entendimento das características termo-hidráulicas de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O é, de maneira geral, ainda incipiente e, para que haja possibilidade de se concluir a análise do comportamento do coeficiente de transferência de calor por convecção e do fator de atrito de nanofluidos em escoamento monofásico no interior de dutos, algumas sugestões serão relacionadas a seguir:

- \* Aprimorar a técnica de preparo das suspensões de nanopartículas, otimizando o processo de homogeneização por alta pressão em termos do tempo e pressão de trabalho para garantir homogeneidade na distribuição de tamanho dos aglomerados de nanopartículas.
- \* Investigar o comportamento das suspensões de nanopartículas quando submetidas a gradientes de temperatura e pressão e, em consequência, avaliar a eficácia das técnicas atuais de medição das propriedades termofísicas de fluidos puros quanto a aplicabilidade na medida de propriedades das suspensões de nanopartículas.
- \* Analisar, mais detalhadamente, o comportamento da homogeneidade e estabilidade das dispersões de nanopartículas frente ao uso ou não de surfactantes e a influência destes no comportamento termo-hidráulico dos nanofluidos.
- \* Realizar ensaios com nanofluidos preparados com outras concentrações em massa de nanopartículas com o objetivo de avaliar, com mais detalhes, o efeito desta no coeficiente de transferência de calor e no fator de atrito.
- \* Investigar experimentalmente o comportamento termo-hidráulico das amostras de nanofluidos em escoamento monofásico em tubos de diferentes diâmetros.

- \* Propor, a partir do amplo banco de dados, modelos para a predição das propriedades termofísicas e do coeficiente de transferência de calor de nanofluidos.
- \* Implementar modificações no equipamento experimental que permitam a aquisição de dados que possibilitem a comparação dos resultados a partir de parâmetros distintos daqueles empregados no presente estudo.

### **6.3 Considerações Finais**

Tem sido expressivo o empenho da comunidade científica na tentativa de esclarecer os mecanismos físicos associados ao comportamento de transferência de calor e escoamento de nanofluidos. Entretanto, dada a diversidade de fatores que influenciam tal comportamento, ainda são bastante controversos os resultados apresentados até o presente momento e, neste sentido, a presente pesquisa se insere no esforço para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia de nanofluidos. A pretensão deste trabalho foi a de contribuir para a ampliação do banco de dados referentes à transferência de calor por convecção e fator de atrito de nanofluidos de NTCs/H<sub>2</sub>O e, com isso, colaborar para o melhor entendimento do comportamento termofísico dos nanofluidos.



## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALIAS, H.; WEI, H. P., Synthesis and flow behavior of carbon nanotubos nanofluids. **Journal Teknologi**, no. 51(F), 2009, pp. 143 - 156.

AMROLLAHI, A.; HAMIDI, A. A.; RASHIDI, A. M., The effects of temperature volume fraction and vibration time on the thermo-physical properties of a carbon nanotubos suspension (carbon nanofluido). **Nanotechnology**, no. 19, 2008, 315701, 8 págs.

AMROLLAHI, A.; RASHIDI, A. M.; MEIBODI, E. M.; KASHEFI, K., Conduction heat transfer characteristics and dispersion behaviour of carbon nanofluids as a function of different parameters. **Journal of Experimental Nanoscience**, vol. 4, no. 4, 2009, pp. 347 - 363.

ANOOP, K. B.; SUNDARARAJAN, T.; DAS, S. K., Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluido in the developing region. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 52. no. 9-10, 2009. pp. 2189 - 2195.

ASIRVATHAM, L. G.; RAJA, B.; LAL, D. M.; WONGWISES, S., Convective heat transfer of nanofluids with correlations. **Particuology** no. 9, 2011, pp. 626 - 631.

ASSAEL, M. J.; CHEN C. F.; METAXA, I. N.; WAKEHAM, W.A., Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water. **International Journal of Thermophysics**, Proceedings of the Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties, Part II, vol. 25, no.4, 2004, pp. 971 - 985.

ASSAEL, M. J.; METAXA, I. N.; ARVANITIDIS, J.; CHRITOPHILOS, D.; LIOUTAS, C., Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants. **International Journal of Thermophysics**, no. 26, 2005, 647 - 664.

ASSAEL, M. J.; METAXA, I. N.; KAKOSIMOS, K.; CONSTANTINOU, D., Thermal conductivity of nanofluids - Experimental and Theoretical. **International Journal of Thermophysics**, vol. 27 no. 4, 2006, pp. 999 - 1017.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química:** questionando a vida moderna e o meu ambiente. 5 ed., Editora BOOKMAN, Porto Alegre, 2001.

BAI, J. B.; HAMON, A. L.; MARRAUD, A., JOUFFREY, B., ZYMLA, V., Synthesis of SWNTs and MWNTs by a molten salt (NaCl) method. **Chemical Physics Letters**, vol. 365, no. 1-2, 2002, pp. 184 - 188.

BERGLES , A. E., **Techniques to Augment Heat Transfer.** Handbook of Heat Transfer Applications, 2 ed., Editora McGraw-Hill , New York , 1985.

BETCHELOR , G. K., The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles. **Journal of Fluid Mechanics**, no. 83, 1977, 97 - 117.

BEIRCUK, M. J.; LLAGUNO, M. C.; RADOSAVIJEVIC, M.; HYUN, J. K.; JHONSON, A. T.; FISCHER, J. E., Carbon nanotube composites for thermal management. **Applied Physics Letters**, vol. 80, no. 15, 2002, pp. 2767 - 2779.

BELIN, T.; EPRON, F., Characterization methods of carbon nanotubes: a review. **Materials Science and Engineering**, vol. 119, no. 2, 2005, pp. 105 - 118.

BERBER, S.; KWON, Y. K.; TOMÁNEK, D., Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes. **Physical Review Letters**, vol. 84, no. 20, 2000, pp. 4613 - 4616.

BERGMAN, T. L., Effect of reduced specific heats of nanofluids on single phase, laminar internal forced convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, no. 52, 2009, pp. 1240-1244.

BETHUNE, D. S.; KIANG, C. H.; DE VRIES, M. S., Carbon nanotubes with single-atomic-layer wall. **Nature - USA**, no. 363, 1993, pp. 605-607.

BOCQUET, L.; CHARLAIX, E., Nanofluidics from bulk to interfaces. **Chemical Society Reviews**, no. 39, 2009, pp. 1073-1095.

BRINKMAN, H. C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The journal of Chemical Physics**, no. 20, 1952, pp. 571-573.

BRUIJIN, H., The viscosity of suspensions of spherical particles. **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**, vol. 61, no. 12, 1942, pp. 863-874.

BUONGIORNO, J., Convective Transport in Nanofluids. **Journal Heat Transfer**, vol. 128, no. 3, 2006, pp. 240-250.

CASQUILLAS, G. V.; LE BERRE, M.; PEROZ, C.; CHEN, Y. ; GREFFET, J. J., Microlitre hot strip devices for thermal characterization of nanofluids. **Microelectronic Engineering** , no. 84, 2007, pp. 1194-1197.

CHEIN, R.; CHUANG, J., Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, no. 46, 2007, pp. 57-66.

CHEN, H.; DING, Y.; LAPKIN, A.; FAN, X., Rheological behavior of ethylene glycol-titanate nanotube nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, vol. 11, no. 6, 2009, pp. 1513 - 1520.

CHEN, L.; XIE, H. ; LI, Y. ; YU, W., Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. **Thermochimica Acta**, vol. 477, no 1-2, 2002, pp. 21 - 24.

CHIANG, I. W., BRISON, B. E., SMALLEY, R. E., MARGRAVE, J. L., HAUGE, R. H., Purification and characterization of single-wall carbon nanotubes. **Journal Phys. Chem. B**, vol. 105, no.6, 2001, pp. 1157 - 1161.

CHOI, E. S.; BROKS, J. S.; EATON, D. L.; AL-HAIK, M. S.; HUSSAINE, M. Y.; GARMESTANI, H.; LI, D.; DAHMEN, K., Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing. **Journal of Applied Physics**, vol. 94, no. 9, 2003, pp. 6034 - 6039.

CHOI, S.U.S, Development and applications of Non-Newtonian flows. **American Society of Mechanical Engineers**, New York, NY, USA, vol. 231, no. 66, 1995, pp. 99 - 105.

CHOI, S. U. S. e EASTMAN, J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **International Mechanical Engineering Congress and Exhibition**, San Francisco, CA , 1995.

CHOI, S. U. S.; ZHANG, Z. G.; YU, W.; LOCKWOOD, F. E.; GRULKE, E. A., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension. **Appl. Physics Letters**, vol. 79, no.14, 2001, pp. 2252,.

DAVIS, R. H., The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions. **International Journal of Thermophysics**. vol 7, no. 3, 1986, pp. 609-620.

DING, Y.; ALIAS, H.; WEN, D.; WILLIAMS, R. A., Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. vol. 49 , no. 1-2, 2006, pp. 240-250.

DRESSELHAUS, M. S.; DRESSELHAUS, G.; EKLUND, P. C., Science and fullerenes and carbon nanotubes. New York: Academic Press, 1996.

DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S., An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of  $TiO_2$ -water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. **International Journal of Heat and Mass Trans**, vol. 53, no. 1-3, 2010, pp. 334-344.

EASTMAN, J. A.; CHOI, S. U. S.; LI, S.; THOMPSON, L. J.; LEE, S., Enhancement thermal conductivity through the development of nanofluids. **in: 1996 Fall meeting of the Materials Research Society (MRS)**, Boston, USA, 1997.

EASTMAN, J. A., CHOI, S. U. S., LI, S., YU, W., THOMPSON, L.J. , Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles.

**Applied Physics Letters**, vol. 78, no. 6, 2001, pp. 718 - 720.

EINSTEIN, A., Eine neue Bestimmung der molekulardimensionen. **Annalen der Physik** , vol. 19, 1906, pp. 289-306.

FERREIRA, TIAGO HILÁRIO, Nanoestruturas de Nitreto de Boro: síntese, caracterização e purificação, Dissertação de Mestrado Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear - CDTN, Belo Horizonte - MG , 2010.

GARG, P.; ALVARADO, J. L.; MARSH, C.; CARLSON, T. A.; KESSLER, D. A.; ANNAMALAI, K., An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat performance of multi-wall carbon nanotube - based aqueous nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 52, no. 21-22, 2009, pp. 5090 - 5101.

GHANDI K. S., Thermal properties of nanofluids: controversy in the making?. **Current Science**, vol.92, no 6, 2007, pp.717-718.

GODSON, L.; RAJA, B.; LAL, D. M.; WONGWISES, S., Enhancement of heat transfer using nanofluids - An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 14, no.2, 2010, pp. 629-641.

GODSON, L.; RAJA, B.; MOHAN LAL, D.; WONGWISES, S., Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of Silver-Deionized Water Nanofluid. **Experimental Heat Transfer**, vol. 23, no. 4 , 2010, pp. 317 - 332.

HAFNER, J. H.; BRONIKOWSKI, M. J.; AZAMIAN, B. R.; NIKO-LAEV, P.; RINZLER, A. G.; COLBERT, D. T.; SMITH, K. A.; SMALLEY, R. E., Catalytic growth of single-wall carbon nanotubes from metal particles. **Chemical Physics Letters**, vol. 296, 1998, pp. 195 - 202.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **IEC Fundamentals I**, vol. 1, no.3, 1962, 187 - 191.

HE, Y.; JIN, Y.; CHEN, H.; DING, Y.; CANG, D.; LU, H., Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 50, no. 11-12, 2007, pp. 2272 - 2281.

HERIS, S.Z.; ESFAHANY , M. N.; ETEMAD, S. Gh., Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 28, no.2, 2007, pp. 203-210.

HOJJAT, M., ETEMAD, S. Gh., BAGHERI, R., THIBAULT, J., THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NON-NEWTONIAN NANOFLOUIDS. Proceeding of **8th World Congress of Chemical Engineering**, Montreal, Canada, 2009.

HWANG, Y. J.; AHN, Y. C.; SHIN, H. S.; LEE, C. G.; KIM, G. T.; PARK, H. S.; LEE, J. K., Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. **Current Applied Physics**, vol. 6, no. 6, 2006, pp. 1068 - 1071.

HWANG Y. J.; LEE, J. K.; LEE, C. H.; JUNG, Y. M.; CHEONG, S. I.; LEE, C. G.; KU, B. C., Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. **Thermochimica Acta**, vol. 455, no. 1-2, 2007, pp. 70 - 74.

IIJIMA, S., Helical microtubes of graphitic carbon. **Nature**. LONDON, vol. 354, 1991, pp. 56 - 58.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S., Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, vol. 84, no. 21, 2004, pp. 4316 - 4318.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S., Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, vol. 26, no. 17-18, 2006, pp. 2457 - 2463.

JEFFERY, D.J., Conduction Through a Random Suspension of Spheres. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences** vol. 335, 1973, pp. 355 - 367.

JOACHIN, C.; PLÉVERT, L., **Nanociências: a revolução invisível**. 1 ed. Editora Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 2009.

KATO, T.; JEONG, G. H.; HIRATA, T., HATAKEYAMA, R., Single-walled carbon nanotubes produced by plasma-enhanced chemical vapor deposition. **Chemical Physics Letters**, vol. 381, no. 3-4, 2003, pp. 422 - 426.

KATO, T. JEONG, G .H.; HIRATA, T.; HATAKEYAMA, R.; TOHJI, K., Freestanding Individual Single-walled Carbon Nanotube Synthesis Based on Plasma Sheath Effects. **Jpn. Journal Applied Physics**, vol. 43, Part 2, pp. 1278 - 1280.

KEBLINSKI, P.; PHILLPOT, S. R.; CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 45, no. 4, 2002, pp. 855 - 863.

KEBLINSKI, P.; EASTMAN, J. A.; CAHILL, D. G., Nanofluids for thermal transport. **Materials Today**, Vol. 8, no. 6, 2005, pp. 36 - 44.

KEBLINSKI, P.; PRASHER, R.; EAPEN, J., Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over?. **Journal of Nanoparticle Research**, vol. 10, no. 7, 2008, pp. 1089 - 1097.

KHANAFER, K.; VAFAI, K.; LIGHTSTONE, M., Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 46, no. 19 , 2003, pp.3639-3653.

KHANAFER, K.; VAFAI, K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 54, no. 19-20, 2011, pp. 4410 - 4428.

KIM, P.; S HI, L.; MAJUDAR, A.; McEUEN, P. L., Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. **Physical Review Letters**, vol. 87, no. 21, 2001, 215502/ 1-4.

KO, G. H.; HEO, K., LEE, K. ; KIM, D. S. ; KIM, C.; SOHN, Y.; CHOI, M., An Experimental Study on the Pressure Drop of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes in a Horizontal Tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 50, no. 23-24 , 2007, pp. 4749 - 4753.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C., A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research** vol. 6, no 6. 2004, pp. 577 - 588.

KROTO, H. W.; HEATH, J. R.; O BRIEN, S. C.; CURL, R. F.; SMALLEY, R. E., C<sub>60</sub>: buckminsterfullerene. **Nature**. USA, vol. 318, 1985, pp. 162 - 163.

KUMAR, D. H.; PATEL, H. E.; KUMAR, V. R. R.; SUNDARARAJAN,T.; PRADEEP, T.; DAS, S. K., Model for heat conduction in nanofluids. **Phys. Rev. Let.**, vol. 93, 2004, pp. 4301 - 4304.

KUMARESAN. V.; KHADER, S. M. A.; KARTHIKEYAN, S.; VELRAJ, R., 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**, vol. 60, 2013, pp. 413 - 421.

LAMAS, B. C.; FONSECA I. M. A.; GONÇALVES, F. A. M. M.; FERREIRA, A. G. M.; KANGARJ, S.; MARTINS, N.; OLIVEIRA, M. S. A., EG/CNTs Nanofluids Engineering and Thermo-Rheological Characterization. **Journal of Nano Research**, vol. 13, 2011, pp. 69 - 74.

LAPLAZE, D.; BERNIER, P.; MASER, W. K.; FLAMANT, G.; GUILLARD, T., LOISEAU, A., Carbon nanotubes: The solar approach. **Carbon**, vol. 36, no. 5-6, 1998, pp. 685 - 688.

LEE, J.; MUDAWAR, I., Assessment of the effectiveness of nanofluids for single phase and two-phase heat transfer in micro-channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 50, no. 3-4 , 2007, pp. 452 - 463.

LEE, S.; CHOI, S. U. S., Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems, in: 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, USA, 1996.

LI, Q.; XUAN, Y., Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-Water nanofluid. **Science in China Series E: Thecnological Sciences**, vol. 45, no. 4, 2002, pp. 408 - 416.

LIAN, Y., MAEDA, Y., WAKAHARA, T., AKASAKA, T., KAZAOUI, S., MINAMI, N., SHIMIZU, T., CHOI, N., TOKUMOTO, H., Nondestructive and High-Recovery-Yield Purification of Single-Walled Carbon Nanotubes by Chemical Functionalization. **Journal of Physical Chemistry B**, vol, 108, no. 26, 2004, pp. 8848 - 8854.

LIU, M. S.; LIN, M. C. C.; HUANG, I. T.; WANG, C. C., Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, vol. 32, no. 9, 2005, pp. 1202 - 1210.

LOA, C.; TSUNGA, T.; CHENB, L., Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of crystal Growth**, vol. 277, no. 1-4, 2005, pp. 636-642.

MAIGA, S. E. B.; NGUYEN, C. T.; GALANIS, N.; ROY, G., Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. **Superlattices and microstructures**, vol. 35, no. 3-6, 2004 (a), pp. 543 - 557.

MAIGA, S. E. B., NGUYEN, C. T., GALANIS, N., ROY, G., Hydrodynamic and thermal behaviours in a uniformly heated tube, in: Computational studies, WIT Press, Southampton, SO40 7AA, United Kingdom, Portugal, vol. 5, 2004 (b), pp. 453-462.

MAIGA, S. E. B.; PALM, S. J.; NGUYEN, C. T.; ROY, G.; GALANIS, N., Heat Transfer Enhancement by Using nanofluids in forced Convection Flows. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 26, no. 4, 2005, pp. 530 - 546.

MAIGA, S. E. B.; NGUYEN C. T.; GALAINS, N.; ROY, G.; MARE, T.; COQUEUX, M., Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle suspension. **International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow**, vol. 16, no. 3, 2006, pp. 275 - 292.

MASCHMANN, M. R.; AMAMA, P. B.; GOGAL, A.; IQBAL, Z.; GAT, R.; FISHER, T. S., Parametric study of synthesis conditions in plasma-enhanced CVD of high-quality single-walled carbon nanotubes. **Carbon**, vol. 44, no.1, 2006, pp. 10 - 18.

MASER, W. K.; BENITO, A. M.; MARTINES, M. T., Production of carbon nanotubes: the light approach. **Carbon**, vol. 40, no. 10, 2002, pp. 1685 - 1695.

MASUDA, H.; EBATA, A.; TERAMAE, K.; HISHINUMA, N., Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of a -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles). **Netsu Bussei**, vol 7, no. 4, 1993, pp. 227 - 233.

MAXWELL, J. C., **A treatise on electricity and magnetism**. Oxford, NY, UK: Oxford: Clarendon, Dover publications, 1873.

NAN, C. W.; BIRRINGER, R.; CLARKE, D. R.; GLEITER, H., Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. **Journal of Applied Physics**, vol. 81, no. 10, 1997, pp. 6692 - 6699.

NAN, C. W.; SHI, Z.; LIN, Y., A Simple Model for Thermal Conductivity of Carbon Nanotube-Based Composites. **Chemical Physics Letters**, vol. 375, no. 5-6, 2003, 666 - 669.

NGUYEN, C. T., DESGRANGES, F., GALANIS, N., ROY, G., MARÉ, T., BOUCHER, S., MINTSA, H. A., Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 47, no. 2, 2008, pp. 103 - 111.

OLIVEIRA, G.A. Síntese e caracterização de nanofluidos de prata. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

PAK, B. C.; CHO, Y. I., Hydrodynamic and Heat Transfer Study of dispersed Fluids with Sub-micron Metallic oxide Particles. **Experimental Heat Transfer**, vol. 11, no. 2, 1999, pp. 151 - 170.

PONMOZHI, J.; GONÇALVES, F. A. M. M.; FERREIRA, A. G. M.; FONSECA, I. M. A.; KANAGARAJ, S; MARTINS, N.; OLIVEIRA, M. S. A., Thermodynamic and transport Properties of CNT - Water Based Nanofluids. **Journal of nano Research**, vol. 11, 2010, pp. 101 - 106.

PRASHER, R. S.; BHATTACHARYA, P.; PHELAN, P. E., Brownian motion based convective conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids. **Journal Heat Transfer**, vol. 128, no. 6 , 2006, pp. 588 - 595.

PUTRA, N.; ROETZEL, W.; DAS, S. K., Natural convection of nano-fluids. **Heat and Mass Transfer**, vol. 39, no. 8-9, 2003, pp. 775 - 784.

RASHIDI, F.; MOSARAVI, N., Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Coefficient of CNTs Nanofluid under Constant Heat Flux. **Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2011**. London, U.K., Vol. III, 2011.

SÁEZ ACUÑA, J. J., Emissão eletrônica de nanoestruturas de carbono produzida por campos elétricos. Tese Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP, Campinas, SP. 2009.

SHANTHI, R.; ANANDAN, S. S.; RAMALINGAN, V., Heat transfer enhancement using nano-fluids - an review. **Thermal Science International Scientific Journal**, vol. 16, no. 2, 2012, pp. 423 - 444.

SINGH, A. K., Thermal Conductivity of Nanofluids. **Defence Science Journal**, vol. 58, no. 5, 2008, pp. 600 - 607.

SOMMERS, A. D.; YERKES, K. L., Experimental investigation into the convective heat transfer and system-level effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -propanol nanofluido. **Journal of Nanoparticle Research**, vol. 12, no. 3, 2009, pp. 1003 - 1014.

SUNDAR, L. S.; NAIK, M. T.; SHARMA, K. V.; SINGH, M. K.; SIVA REDDY T. CH., Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanofluido. **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol. 37, 2012, pp. 65 - 71.

TIMOFEEVA, E.V.; GAVRILOV, A. N.; McCLOSKEY, J. M.; TOLMACHEV, Y. V., Thermal Conductivity and Particle Agglomeration in Alumina Nanofluids: Experiment and Theory. **Physical Review**, vol. 76, 2007, pp. 061203/ 1 - 16.

TOMA, HENRIQUE E., **O mundo nanométrico:** a dimensão do novo século. 2. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

TRISAKSRI, V.; WONGWIES, S., Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. **Renewable and sustainable energy Reviews**, vol. 11, no. 3, 2007, pp. 512 - 523.

VAND, V., Viscosity of solutions and suspensions I: Theory. **Journal of Physical and Colloid Chemistry**, vol. 52, 1948, pp. 277 - 299.

VIJJHA, R. S., DAS, D. K., KULKARNI, D. P., Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 53, no. 21-22, 2010, pp. 4607 - 4618.

VIVEKCHAND, S. R. C., GOVINDARAJ, A., SEIKH, M. M., RAO, C. N. R., New Method of Purification of Carbon Nanotubes Based on Hydrogen Treatment. **Journal of Physical Chemistry B**, vol. 108, no. 22, 2004, pp. 6935 - 6937.

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** vol. 46, no. 14, 2003, pp. 2665 - 2672.

WANG, Q. X.; MUJUMDAR, S. A., Heat transfer characteristics of nanofluids: a Review. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 46, no. 1, 2007, pp. 1-19.

WANG, X., XU, X., CHOI, S. U. S. Thermal Conductivity of Nanoparticles-Fluid Mixture. **Journal of Thermophys and Heat Transfer**, vol. 13, no. 4, 1999, pp. 474 - 480.

WANG, Y. Y.; GUPTA, S.; NEMANICH, R. J., Role of thin Fe catalyst in the synthesis of double- and single-wall carbon nanotubes via microwave chemical vapor deposition. **Applied Physics Letters**, vol. 85, no. 13, 2004, pp. 2601 - 2603.

WASP, E. J., ; KENNY, J. P.; GANDHI, R. L., Solid-Liquid Flow: Slurry Pipeline Transportation. Trans Tech Publications, 1977, p. 172.

WEN, D.; DING, Y., Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, vol. 18, no. 4, 2004 (a), pp. 481 - 485.

WEN, D.; DING, Y., Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at entrance area under laminar flow region. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 47, no. 24, 2004 (b), pp. 5181 - 5188.

WILLIAMS, W.; HU, L-W; BUONGIORNO, J., Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes. **Journal of Heat Transfer**, Vol. 130, no.4, 2008, pp. 42412 - 42419

XIE, H.; WANG. J.; XI, T.; LIU,Y., Thermal conductivity of suspensions containing Nanosized SiC Particles. **International Journal of thermophysics**, vol. 23, no. 2, 2002, pp. 571 - 580.

XIE H.; LEE H.; YOUN W.; CHOI, M., Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. **Journal of Applied Physics**, vol. 94, no. 8, 2003, pp. 4967 - 4971.

XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X., Effect of Interfacial Nanolayer on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 48, no. 14, 2005, pp. 2926 - 2932.

XUAN, Y.; LI, Q., Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 21, no. 1, 2000, pp. 58 - 64.

XUAN, Y.; Li Q., Investigation on convective heat transfer and flow features on nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, vol. 125, 2003, pp. 151- 155.

XUAN, Y. M.; ROETZEL, W., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 43, no. 19, 2000, pp. 3701-3707.

XUE, L.; KEBLINSKI, P.; PHILLPOT, S. R.; CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A., Effect of liquid layering at the liquid-solid interface on thermal transport. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol. 47, no. 19-20, 2004, pp. 4277 - 4284.

YAMADA, E.; OTA, T., Effective thermal conductivity of dispersed material. **Wa"rme-und Stoffu"bertragung**, Vol 13, 1980, pp. 27 - 37.

YANG, Y.; GRULKE, E. E.; ZHANG, Z. G.; WU, G., Temperature effects on the rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 298, 2007, pp. 216 - 224.

YANG, Y.; ZHONG, Z. G.; GRULKE, E. A.; ANDERSON, W. B.; WU, G., Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersion (nanofluids) in laminar flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 48, 2005, pp. 1107 - 1116.

YU, W.; XIE, H., A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. **Journal of Nanomaterials**, Vol. 2012, 2011, 17 págs.

ZENG, Q.; LI, Z.; ZHOU, Y., Synthesis and Application of Carbon Nanotubes. **Journal of Natural Gas Chemistry**, vol. 15, no. 1 pp. 235 - 246.

ZHOU, S. Q.; NI, R., Measurement of the specific heat capacity of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. **Applied Physics Letters**, vol. 92, 2008, 093123, 3 págs.