



Inês Fonseca Carvalho **Caracterização Experimental do Coeficiente de**
de Matos **Transferência de Calor por Convecção em Sistemas**
Nano-fluídicos



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2015

Inês Fonseca Carvalho de Matos **Caracterização Experimental do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção em Sistemas Nano-fluídicos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Hugo Miguel Filipe Calisto
Investigador na European Commission Joint Research Centre, Institute For Energy And Transport,
Energy Security Unit

Orientador

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero aqui deixar os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível.

Agradeço à Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia pela sua total disponibilidade, paciência e ajuda.

Quero também agradecer ao Eng. Bruno Abreu por todo o seu apoio, paciência e motivação, ao longo de todos estes meses.

Aos membros do grupo de investigação GRIDS-DIMOULD pelo seu apoio e companhia.

Agradeço aos meus pais e irmão pela compreensão e ajuda.

Ao Alexandre pelo seu apoio ao longo desta etapa.

palavras-chave

Nanofluidos, nanotubos de carbono, coeficiente de transferência de calor por convecção forçada, propriedades termofísicas

resumo

A intensificação da transferência de calor em sistemas industriais e de consumo, assim como o uso racional de energia, são preocupações cada vez mais comuns em engenharia. Para dar resposta aos desafios atuais, uma nova classe de fluidos de transferência de calor tem vindo a ser desenvolvida, impulsionada pelos avanços da nanotecnologia nos últimos anos. Estes novos fluidos, denominados nanofluidos, são suspensões de partículas de escala nanométrica, dispersas num fluido convencional. A literatura é unânime na identificação do seu potencial enquanto fluidos de permuta, devido às suas propriedades termofísicas superiores às dos fluidos convencionais. Contudo, a sua aplicação prática em sistemas térmicos permanece por realizar, essencialmente devido à escassez de estudos experimentais capazes de simular a transferência de calor em condições reais. Neste sentido, foi realizado um trabalho experimental de caracterização do coeficiente de transferência de calor por convecção de sistemas nano-fluídicos, sujeitos a escoamentos laminares em desenvolvimento num tubo circular horizontal. O estudo desenvolvido centrou-se na caracterização de nanofluidos contendo nanotubos de carbono (CNT), uma vez que estas nanopartículas possibilitam a produção de dispersões estáveis e duradouras, além de possuírem elevadas propriedades termofísicas. Para o efeito, foram desenvolvidas metodologias de preparação e estabilização de nanofluidos contendo CNT, tendo sido também caracterizadas as suas propriedades termofísicas. O trabalho experimental conduzido consistiu na observação do comportamento de nanofluidos com concentrações de 0,25% e 0,5% de CNT, quando sujeitos a diferentes escoamentos e temperaturas de ensaio. A análise paramétrica dos resultados possibilitou avaliar a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos sob as diferentes condições experimentais, e estabelecer comparações com os valores registados para o fluido base sob as mesmas condições de ensaio.

Com a realização desta dissertação foi possível estabelecer relações entre as diversas variáveis envolvidas na transferência de calor por convecção, e que influenciam o desempenho dos nanofluidos, nomeadamente a concentração das nanopartículas, a temperatura, a velocidade e o número de Reynolds do escoamento, ao mesmo tempo que se procurou compreender os mecanismos envolvidos, tendo-se evidenciado a necessidade de realizar novos trabalhos experimentais no futuro que possibilitem corroborar a repetibilidade dos resultados obtidos.

keywords

Nanofluids, carbon nanotubes, forced convective heat transfer coefficient, thermophysical properties

abstract

The increase of heat transfer in industrial and consumer systems and the rational use of energy, are becoming common concerns in engineering. To address the current challenges, a new class of heat transfer fluids has been developed, driven by advances in nanotechnology in recent years. These new fluids, named nanofluids, are suspensions of nanoscale particles dispersed in a conventional fluid. The literature is unanimous in identifying their potential as exchange fluids due to their thermophysical properties superior to those of conventional fluids. However, its practical application in thermal systems remains unfulfilled, mainly due to the scarcity of experimental studies to simulate the heat transfer in real conditions. Therefore, an experimental study was conducted to characterize the convective heat transfer coefficient of nanofluidic systems, subjected to developing laminar flow in a horizontal circular tube. The study carried out focused on the characterization of nanofluids containing carbon nanotubes (CNT), since these nanoparticles enable the production of durable and stable dispersions, and have high thermophysical properties. For this purpose, the preparation and stabilization methodologies of nanofluids containing CNT have been developed, and their thermophysical properties were also characterized. The conducted experimental work was established by the observation of the nanofluids behavior with CNT concentrations of 0,25% and 0,5%, when subjected to different test flows and temperatures. The results of the parametric analysis allowed to evaluate the variation of the convective heat transfer coefficient of the nanofluids under different experimental conditions and the comparison with the base fluid values obtained under the same test conditions.

With the development of this work it was possible to establish associations between the multiple variables involved in convective heat transfer, which influence the performance of the nanofluids, including the nanoparticle concentration, temperature, flow velocity and Reynolds number, while aiming to understand the involved mechanisms, which demonstrated the need for further experimental work in the future to enable the validation of the repeatability of the results.

CONTEÚDOS

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 O PROBLEMA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	1
1.2.1 <i>Análise das variáveis de projeto</i>	2
1.2.2 <i>Fluidos de permuta</i>	3
1.3 DESAFIOS DA PRESENTE DISSERTAÇÃO	4
1.4 NANOFLUIDOS DE MWCNT	5
1.5 OBJETIVOS DA PRESENTE DISSERTAÇÃO	6
1.6 GUIA DE LEITURA.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 NANOFLUIDOS	10
2.1.1 <i>Nanopartículas</i>	10
2.1.2 <i>Fluidos base</i>	12
2.2 PREPARAÇÃO DE NANOFLUIDOS	13

2.2.1	<i>Métodos de passo único</i>	13
2.2.2	<i>Métodos de dois passos</i>	14
2.3	ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS	14
2.3.1	<i>Estabilização química</i>	15
2.3.2	<i>Estabilização mecânica</i>	17
2.3.3	<i>Métodos de averiguação da estabilidade dos nanofluidos</i>	19
2.4	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS	20
2.4.1	<i>Densidade</i>	20
2.4.2	<i>Calor específico</i>	22
2.4.3	<i>Viscosidade</i>	24
2.4.4	<i>Condutividade</i>	27
2.5	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA	31
2.5.1	<i>Análise da transferência de calor</i>	34
2.5.2	<i>Mecanismos envolvidos na transferência de calor</i>	35
3	CARACTERIZAÇÃO DOS NANOFLUIDOS	39
3.1	PLANO DE EXPERIÊNCIAS - DOE	39
3.2	FUNCIONALIZAÇÃO DE MWCNT	42
3.3	QUALIDADE DE FUNCIONALIZAÇÃO DOS MWCNT	44
3.3.1	<i>Identificação dos grupos produzidos</i>	45
3.3.2	<i>Avaliação do comportamento térmico</i>	45
3.3.3	<i>Avaliação da distribuição de tamanhos das nanopartículas</i>	47

3.4	DISPERSÃO DE MWCNT	48
3.5	ESTABILIDADE COLOIDAL.....	50
3.5.1	<i>Análise das forças de van der Waals</i>	50
3.5.2	<i>Taxa de sedimentação</i>	51
3.5.3	<i>Averiguação da estabilidade coloidal</i>	52
3.6	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS	54
3.6.1	<i>Viscosidade</i>	54
3.6.2	<i>Condutividade térmica</i>	55
3.6.3	<i>Densidade e calor específico</i>	56
4	MODELO EXPERIMENTAL	59
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	59
4.1.1	<i>Equipamento e procedimento</i>	59
4.1.2	<i>Formulação matemática</i>	62
4.1.3	<i>Incerteza experimental</i>	65
4.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL	68
4.2.1	<i>Averiguação do funcionamento dos termopares</i>	68
4.2.2	<i>Metodologia experimental</i>	70
4.2.3	<i>Ensaio de validação do modelo experimental</i>	71
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
5.1	REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS	82
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	84

5.3	QUANTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	95
5.3.1	<i>Varição relativa face ao fluido base</i>	<i>95</i>
5.3.2	<i>Varição relativa à temperatura.....</i>	<i>100</i>
5.3.3	<i>Varição relativa ao número de Reynolds.....</i>	<i>105</i>
5.4	CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CADA POSIÇÃO AXIAL	109
5.5	ENSAIOS COM ESCOAMENTOS COM O MESMO CAUDAL	113
5.6	REFLEXÃO ACERCA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM O MESMO NÚMERO DE REYNOLDS	119
5.7	ANÁLISE DA DISPERSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	119
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	123
7	REFERÊNCIAS	129
8	ANEXOS.....	147
8.1	REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS	147
8.1.1	<i>Água destilada.....</i>	<i>147</i>
8.1.2	<i>Fluido base.....</i>	<i>152</i>
8.1.3	<i>Nanofluido com 0,25% de MWCNT</i>	<i>156</i>
8.1.4	<i>Nanofluido com 0,5% de MWCNT</i>	<i>160</i>
8.2	CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CADA POSIÇÃO AXIAL	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos comuns à temperatura ambiente (Incropera et al., 2007).	4
Figura 1.2 – Número de publicações por ano sobre nanofluidos de CNT (pesquisa por assunto “nanofluids” e refinado por “carbon nanotubes” no Web of Science a 22 de julho de 2015).	6
Figura 2.1 – Nanotubos de carbono de parede simples (esq.) e de parede múltipla (dir.) (Lamas, 2013).	11
Figura 3.1 - Imagem SEM de MWCNT prístinos (esq.) e funcionalizados (dir.) (adaptado de Lamas, 2013).	44
Figura 3.2 - Espectro de FTIR obtido para MWCNT prístinos e funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013).	45
Figura 3.3 - Gráfico da análise TGA e conseqüente comparação entre MWCNT prístinos e funcionalizados (d50-80 l10-20) (adaptado de Lamas, 2013).	46
Figura 3.4 - Imagem SEM de uma dispersão de MWCNT (a) e representação esquemática do procedimento de medida usado (b) (adaptado de (Lamas, 2013)).	48
Figura 3.5 – Ilustração esquemática do princípio de medição de um analisador de estabilidade <i>LUMiSizer</i> (adaptado de Lamas, 2013).	51
Figura 4.1 – Dispositivo experimental utilizado na realização do trabalho experimental. Principais referências ao equipamento: 1– Analisador de energia; 2 – Reservatório; 3– Bomba peristáltica; 4	

– Zona arrefecimento do fluido; 5– Sistema de aquisição de dados dos termopares; 6 – Secção de teste; Adaptado de Fernandes (2013).	60
Figura 4.2 - Desenho esquemático do dispositivo experimental de transferência de calor por convecção (Fernandes, [s.d.]).	61
Figura 4.3 – Esquematização da aplicação da lei da conservação de energia a um volume de controlo diferencial (adaptado de (Incropera <i>et al.</i> , 2007)).	64
Figura 4.4 – Valores de temperatura registados para cada um dos termopares instalados no equipamento experimental e respetivos valores médios e desvios, sem presença de escoamento de fluido.	68
Figura 4.5 - Valores de temperatura registados para cada um dos termopares instalados no equipamento experimental e respetivos valores médios e desvios, com presença de escoamento de fluido base.	69
Figura 4.6 - Desvio percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	73
Figura 4.7 - Desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica para um escoamento laminar no interior de um tubo circular (adaptados de (Incropera <i>et al.</i> , 2007)).	74
Figura 4.8 - Desenvolvimento da camada limite térmica para um escoamento laminar no interior de um tubo circular (adaptados de (Incropera <i>et al.</i> , 2007)).	75
Figura 4.9 – Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com água destilada e fluido base.	76
Figura 4.10 – Representação do modelo proposto para o cálculo da resistência de contacto (adaptado de (Abreu <i>et al.</i> , 2013)).	77
Figura 4.11 - Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com água destilada e fluido base, após o cálculo da resistência de contacto.	79

Figura 5.1 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	82
Figura 5.2– Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição dos ensaios com desvios superiores a 10%.....	83
Figura 5.3 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	83
Figura 5.4 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição do ensaio com desvios superiores a 10%.	84
Figura 5.5 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	85
Figura 5.6 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	85
Figura 5.7 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	86

Figura 5.8 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	87
Figura 5.9 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	87
Figura 5.10 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	88
Figura 5.11 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1000, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	89
Figura 5.12 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1500, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	89
Figura 5.13 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 2000, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	90
Figura 5.14 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1000, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	90
Figura 5.15 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1500, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	91

Figura 5.16 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 2000, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	91
Figura 5.17 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).....	92
Figura 5.18 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).....	93
Figura 5.19 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	93
Figura 5.20 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).....	94
Figura 5.21 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	96
Figura 5.22 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	96
Figura 5.23 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de	

referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT). 97

Figura 5.24 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT). 98

Figura 5.25 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT). 98

Figura 5.26 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT). 99

Figura 5.27 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT). 100

Figura 5.28 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT). 100

Figura 5.29 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT). 101

Figura 5.30 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	102
Figura 5.31 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	102
Figura 5.32 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	103
Figura 5.33 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).	104
Figura 5.34 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).	104
Figura 5.35 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).	105
Figura 5.36 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	106

Figura 5.37 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	106
Figura 5.38 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	107
Figura 5.39 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).	107
Figura 5.40 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).	108
Figura 5.41- Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).	109
Figura 5.42 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 1,7, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	110
Figura 5.43 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 44,0, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	111

Figura 5.44 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 213,3, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	112
Figura 5.45 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um caudal volúmico de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	114
Figura 5.46 - Coeficiente de transferência de calor por convecção registado para cada fluido na posição axial adimensional (x/D) correspondente o primeiro termopar de superfície para os ensaios realizados com um caudal volúmico de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	115
Figura 5.47 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um caudal de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); N0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; N0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	115
Figura 5.48 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um caudal de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); N0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; N0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	116
Figura 5.49 - Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com os nanofluidos.	120
Figura 5.50 – Representação da curva de tendência da distribuição do número de Nusselt dos dados experimentais e da correlação teórica de Shah.	121
Figura 8.1 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um	

número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	147
Figura 8.2 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1200, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	148
Figura 8.3 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1400, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	148
Figura 8.4 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	149
Figura 8.5 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1600, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	149
Figura 8.6 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1800, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	150
Figura 8.7 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	150
Figura 8.8 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um	

número de Reynolds de 2200, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	151
Figura 8.9 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	151
Figura 8.10 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	152
Figura 8.11 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	152
Figura 8.12 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	153
Figura 8.13 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1400, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	153
Figura 8.14 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	154
Figura 8.15 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e	

escoamento com um número de Reynolds de 1600, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	154
Figura 8.16 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	155
Figura 8.17 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	155
Figura 8.18 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	156
Figura 8.19 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	156
Figura 8.20 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	157
Figura 8.21 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	157
Figura 8.22.....	158

Figura 8.23 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição dos ensaios com desvios superiores a 10%.....	158
Figura 8.24 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	159
Figura 8.25 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	159
Figura 8.26 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	160
Figura 8.27.....	160
Figura 8.28 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	161
Figura 8.29 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	161
Figura 8.30 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura	

de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	162
Figura 8.31 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um caudal volúmico de 1093ml/min, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	162
Figura 8.32 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	163
Figura 8.33 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	163
Figura 8.34 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).....	164
Figura 8.35 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um caudal volúmico de 1093ml/min, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).	164
Figura 8.36- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 65.2, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).	165
Figura 8.37- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 83.3, (70%AD+30%EG - fluido	

base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 165

Figura 8.38- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 107.5, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 166

Figura 8.39- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 128.7, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 166

Figura 8.40- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 149.8, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 167

Figura 8.41- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 171.0 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 167

Figura 8.42- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 192.2, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).
..... 168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Métodos de produção utilizados nas principais investigações envolvendo nanofluidos com partículas de CNT, onde as siglas representam: A - água, EG – etilenoglicol, OM – óleo de motor, OS – óleo de silicone , A+EG – água e etilenoglicol, R113 – fluido refrigerante R113.	18
Tabela 2.2 – Principais investigações no âmbito da caracterização da transferência de calor por convecção de nanofluidos com CNT (CTAC - cloreto de cetil trimetil amónio; A – água; O- óleo de transferência de calor)	33
Tabela 3.1 - Designação dos vários tipos de nanopartículas e suas principais características (adaptado de (Lamas, 2013)).	40
Tabela 3.2 – Fatores de controlo utilizados no estudo.	41
Tabela 3.3 – Volume de água destilada (AD) e etilenoglicol (EG), e massa de nanopartículas (MWCNT) necessários para a produção de 50ml de nanofluido.	49
Tabela 3.4 – Valores de viscosidade obtidos nos ensaios de verificação da estabilidade da mistura para cada amostra de nanofluido produzida com 0,25% de MWCNT, os respetivos desvios à média e precisão das medições. Apresentam-se ainda os valores médios de todas as amostras, desvio máximo e precisão respetiva.	53
Tabela 3.5 - Valores de viscosidade obtidos nos ensaios de verificação da estabilidade da mistura para cada amostra de nanofluido produzida com 0,5% de MWCNT, os respetivos desvios à média e precisão das medições. Apresentam-se ainda os valores médios de todas as amostras, desvio máximo e precisão respetiva.	54
Tabela 3.6 – Valores de viscosidade do fluido base (70%AD+30%EG) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.	55

Tabela 3.7 – Valores de viscosidade do nanofluido com uma concentração de 0,25% de MWCNT (NF0,25%) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.	55
Tabela 3.8 – Valores de viscosidade do nanofluido com uma concentração de 0,5% de MWCNT (NF0,5%) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.	55
Tabela 3.9 – Valores de condutividade térmica do fluido base (70%AD+30%EG) e dos nanofluidos (NF0,25% e NF0,5%) a diferentes valores de temperatura (Lamas, 2013).	55
Tabela 3.10 - Propriedades termofísicas do fluido base em função da temperatura (adaptado de (Incropera <i>et al.</i> , 2007)).	56
Tabela 3.11 – Propriedades termofísicas da água destilada em função da temperatura (adaptado de (Incropera <i>et al.</i> , 2007)).	57
Tabela 4.1 – Principais características do equipamento desenvolvido por Fernandes (2013).	61
Tabela 4.2 – Listagem dos erros associados às diversas variáveis envolvidas na determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção, com os respectivos valores em unidades do sistema internacional (SI).	67
Tabela 4.3 – Resumo das condições testadas com cada um dos fluidos: água destilada e fluido base (70%AD+30%EG), e o número de ensaios realizados em cada situação.	71
Tabela 4.4 – Valores de resistência térmica de contacto correspondentes a cada termopar superfície e respetivo erro determinado com um intervalo de confiança de 95%, em unidades do Sistema Internacional.	78
Tabela 5.1 – Conjunto de parâmetros em análise.	81
Tabela 5.2 – Caudal volúmico dos fluidos, em ml/min, para cada número de Reynolds, à temperatura de 293,15K.	117
Tabela 5.3 - Caudal volúmico dos fluidos, em ml/min, para cada número de Reynolds, à temperatura de 313,15K.	117

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os sistemas de transferência de calor estão presentes na generalidade dos setores industriais e produtos de consumo, e desempenham um papel fulcral na economia mundial e na qualidade de vida humana.

Considerando o rápido aumento da procura mundial de energia, a intensificação do processo de transferência de calor e a redução do desperdício de energia são, atualmente, assuntos de grande importância à escala global (Wen *et al.*, 2009).

Indo ao encontro das realidades e necessidades dos mercados atuais, é um objetivo comum da comunidade científica e industrial desenvolver soluções de engenharia que permitam conciliar a diminuição dos consumos energéticos com a miniaturização dos equipamentos, aumentando o desempenho dos sistemas de transferência de calor atuais e respeitando as normas ambientais (Gupta *et al.*, 2014).

1.2 O PROBLEMA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os sistemas de transferência de calor têm como propósito a permuta de calor entre dois fluidos. Esta troca de calor pode representar muitos fenómenos industriais, como a produção de energia elétrica, mas está também presente na vida quotidiana, quer seja na monitorização da temperatura

de uma habitação, quer no arrefecimento das unidades de processamento de um computador ou *Smartphone*. Desta forma, estes sistemas podem adotar várias designações de acordo com o seu objetivo específico, mas partilham o mesmo princípio de funcionamento, que surge da lei do arrefecimento de Newton (equação 1.1).

$$q = hA\Delta T \quad 1.1$$

Esta Lei, enunciada pela equação 1.1, representa a taxa de transferência de calor por convecção (q), que será tanto maior quanto maior for a área de permuta (A), a diferença de temperatura (ΔT) e o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) (Incropera *et al.*, 2007). Assim, verifica-se que o aumento do desempenho dos sistemas de permuta de calor reais só será possível através do balanceamento das variáveis intervenientes na transferência de calor.

1.2.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Das variáveis de projeto envolvidas na transferência de calor, o aumento da área de transferência é a estratégia mais comum no desenvolvimento de sistemas de permuta de calor. Porém, as tecnologias de aumento de área de permuta, que incluem a utilização de alhetas e microcanais, acarretam custos de produção elevados, e estão a alcançar o limite de complexidade. Simultaneamente, a crescente miniaturização dos equipamentos restringe o aumento da área de permuta, forçando a procura de novas estratégias de aumento do desempenho dos sistemas.

Por outro lado, a diferença de temperatura é geralmente uma condição imposta ao sistema e, por esse motivo, difícil de contornar. Recordando a equação 1.1, o aumento da transferência de calor pode ser então conseguido com o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção. Por sua vez, este pode ser determinado utilizando a equação 1.2 (Incropera *et al.*, 2007).

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad 1.2$$

Segundo a equação 1.2, a transferência de calor por convecção pode ser promovida pelo aumento da condutividade térmica do fluido (k), a redução do diâmetro dos canais (D) e o aumento do número de Nusselt (Nu).

O número de Nusselt é um número adimensional que representa a contribuição dos fenômenos de convecção e condução na transferência de calor. Este depende do número de Reynolds (Re) e do número de Prandtl (Pr), ou seja, das condições de escoamento do fluido e da difusão da quantidade de movimento e calor nas camadas limites hidrodinâmica e térmica do fluido, como se apresenta na equação 1.3,

$$Nu = f\left(Re = \frac{\rho v D}{\mu}, Pr = \frac{c_p \mu}{k}\right) \quad 1.3$$

onde ρ é a densidade, μ é a viscosidade, c_p é o calor específico e v é a velocidade do escoamento do fluido. Consequentemente, o coeficiente de transferência de calor por convecção depende das condições de escoamento das propriedades termofísicas do fluido operante (Incropera et al., 2007).

1.2.2 FLUIDOS DE PERMUTA

Os principais fluidos utilizados nos sistemas de transferência de calor são a água, o ar, o fréon, o etilenoglicol, o hélio e alguns óleos, pois são económicos, seguros e fáceis de utilizar na maioria das soluções de engenharia (Botha, 2006; Choi, 1998).

De entre as propriedades termofísicas envolvidas na transferência de calor, a densidade, a viscosidade, o calor específico e a condutividade térmica são as mais importantes (Incropera *et al.*, 2007). Porém, os fluidos convencionais apresentam propriedades termofísicas limitadas, nomeadamente a condutividade térmica, sobretudo quando comparados com alguns materiais sólidos, como se pode observar na Figura 1.1. Face a esta evidência, o aumento do desempenho dos sistemas de transferência de calor passa pela melhoria das propriedades termofísicas dos fluidos convencionais, o que possibilitaria ainda a redução das dimensões dos equipamentos atuais, bem como a diminuição da complexidade de fabrico dos mesmos. Assim, indo ao encontro das necessidades dos mercados, surgiu desde cedo a hipótese de adicionar partículas sólidas aos fluidos convencionais, como forma de melhorar as suas propriedades termofísicas.

O estudo da adição de partículas sólidas em líquidos iniciou-se em 1873 por Maxwell, que provou ser possível aumentar as propriedades de transferência de calor, adicionando partículas com dimensões milimétricas aos fluidos de permuta convencionais. No entanto, a aplicação destes

fluidos em soluções reais não é exequível, uma vez que partículas desta ordem de dimensão tendem a sedimentar rapidamente, obstruindo os canais de escoamento (Maxwell, 1873).

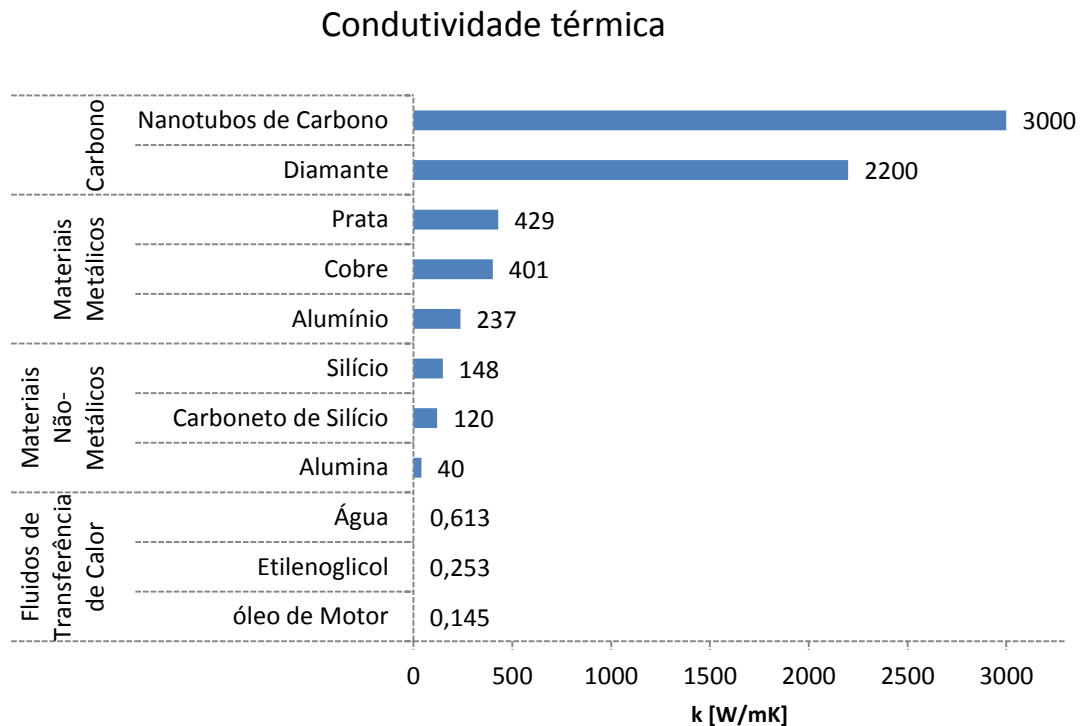


Figura 1.1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos comuns à temperatura ambiente (Incropera et al., 2007).

De forma a ultrapassar estes obstáculos, em 1995, Choi dispersou partículas de dimensão nanométrica em fluidos convencionais. Estes novos fluidos, denominados nanofluidos, apresentaram propriedades de transferência de calor superiores às do fluido base, sobretudo no que diz respeito à condutividade térmica. Os nanofluidos apresentaram ainda estabilidade de longa duração e uma mistura uniforme. Simultaneamente, as quedas de pressão nas tubagens mostraram ser desprezáveis, dadas as dimensões reduzidas das partículas, o que representou o início de uma nova área de investigação (Choi, 1995; Gupta *et al.*, 2014).

1.3 DESAFIOS DA PRESENTE DISSERTAÇÃO

Os nanofluidos surgem como uma alternativa aos fluidos de transferência de calor comuns, tendo em vista o aumento do desempenho dos sistemas atuais e a redução das dimensões dos mesmos.

Ao longo dos últimos vinte anos, muitas investigações têm sido desenvolvidas com o intuito de produzir nanofluidos duradouros, e compreender o contributo da adição de nanopartículas em fluidos de permuta convencionais, no que à transferência de calor diz respeito. Consequentemente, têm sido apresentados estudos com inúmeras combinações de nanopartículas e fluidos base, em diferentes concentrações. Contudo, os nanotubos de carbono (CNT) são repetidamente mencionados em investigações teóricas e experimentais como as nanopartículas mais promissoras, devido às suas propriedades térmicas, uma vez que estes possuem os valores de condutividade térmica mais elevados, como se pode constatar na Figura 1.1 (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

A literatura é unânime no reconhecimento do potencial dos nanofluidos enquanto fluidos térmicos. No entanto, a falta de rigor subjacente às técnicas de preparação dos mesmos e de caracterização das suas propriedades termofísicas levam a que a operacionalização industrial esteja longe de ser concretizável.

Assim, urge modelar o comportamento destes novos fluidos na transferência de calor por convecção, a fim de possibilitar a aplicação de nanofluidos em sistemas de permuta reais, em particular os que contêm CNT.

1.4 NANOFLUIDOS DE MWCNT

Os resultados das investigações presentes na literatura revelam o grande potencial dos nanofluidos de CNT enquanto fluidos de transferência de calor, o que se tem traduzido num crescente número de publicações sobre este assunto ao longo dos anos, como se pode visualizar na Figura 1.2.

Os CNT podem apresentar-se segundo duas formas estruturais, os nanotubos de parede única, ou (*single-walled carbon nanotubes* – SWCNT) e os nanotubos de paredes múltiplas (*multi-walled carbon nanotubes* – MWCNT). Das investigações presentes na literatura, a maioria são referentes a nanofluidos de MWCNT, o que pode estar relacionado com os elevados custos de produção de SWCNT. No entanto, as publicações existentes sobre CNT apresentam alguma falta de consistência quando são comparadas investigações de diferentes grupos de trabalho (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

Dado o potencial dos nanofluidos de CNT, é oportuno providenciar informação que possa contribuir para a compreensão destes nanofluidos, enquanto fluidos de transferência de calor.

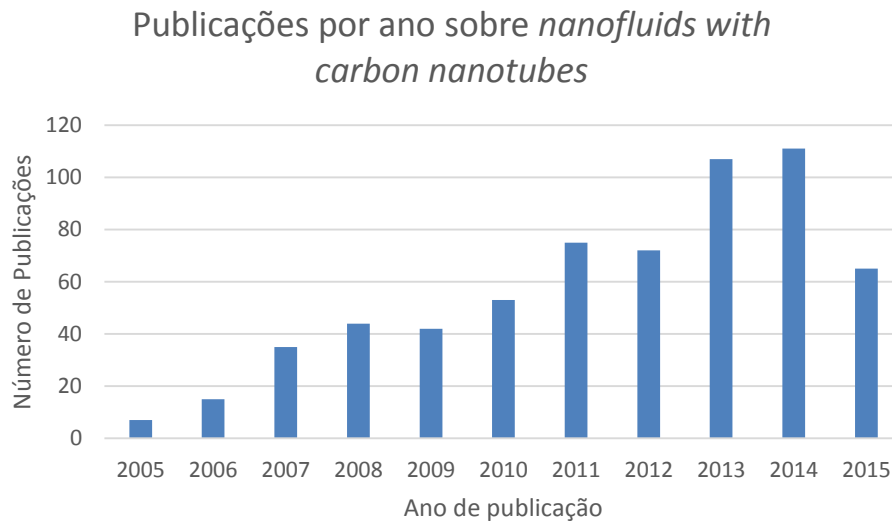


Figura 1.2 – Número de publicações por ano sobre nanofluidos de CNT (pesquisa por assunto “nanofluids” e refinado por “carbon nanotubes” no Web of Science a 22 de julho de 2015).

1.5 OBJETIVOS DA PRESENTE DISSERTAÇÃO

Com o desenvolvimento da presente dissertação, pretende-se caracterizar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor de sistemas nanofluídicos sujeitos a escoamentos laminares num tubo circular horizontal. Propõe-se a adição de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT) em diluições de 30% em volume de etilenoglicol em água destilada, e estudar a influência de várias variáveis, nomeadamente, a fração volúmica dos MWCNT, a temperatura do fluido e a velocidade do escoamento na transferência de calor. Especial atenção será dada à região de desenvolvimento do escoamento, visto que o coeficiente de transferência de calor é superior nesta zona.

Neste contexto, com recurso a equipamentos experimentais *in situ*, será desenvolvida uma metodologia experimental específica, com o intuito de testar e monitorizar o desempenho térmico dos nanofluidos. Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho tem como objetivos específicos:

- 1) Aprender a metodologia de preparação de nanofluidos;
- 2) Caracterizar os nanofluidos do ponto de vista da sua estabilidade coloidal;

- 3) Caracterizar as propriedades termofísicas do sistema em estudo;
- 4) Aprender e desenvolver a metodologia dedicada à caracterização do coeficiente de transferência de calor na região de entrada;
- 5) Estudo do comportamento do fluido quando sujeito a diferentes condições de escoamento em regime laminar.

Em suma, com a realização desta dissertação, pretende-se responder à pergunta: Em que medida um determinado nanofluido é favorável face a um fluido convencional, considerando um conjunto de condições, nomeadamente, a concentração volúmica de nanopartículas, a temperatura de ensaio e características do escoamento?

1.6 GUIA DE LEITURA

A presente dissertação de mestrado encontra-se organizada em seis capítulos. No capítulo 1 são evidenciados os desafios atuais inerentes ao desenvolvimento de sistemas de transferência de calor, assim como os caminhos a seguir para a melhoria do seu desempenho. É proposto o estudo dos nanofluidos de MWCNT como forma de colmatar as limitações impostas pelas propriedades dos fluidos convencionais. Neste capítulo são também definidos os objetivos e contributos a alcançar com o desenvolvimento deste trabalho, bem como a estrutura desta dissertação, que agora se apresenta.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica onde são abordados os conceitos de nanofluidos de MWCNT, nomeadamente as metodologias existentes para a produção e estabilização de nanofluidos. Reportando o contributo de outras investigações presentes na literatura, são caracterizadas as principais propriedades termofísicas dos nanofluidos, apontando os desafios intrínsecos ao seu desenvolvimento enquanto fluidos de transferência de calor.

No capítulo 3 apresenta-se o plano de experiências (DOE) realizado para o desenvolvimento desta investigação experimental. São identificados parâmetros a considerar na realização dos ensaios e os nanofluidos a produzir. Definem-se as metodologias a utilizar na funcionalização de MWCNT, na preparação de nanofluidos, bem como na averiguação da qualidade da funcionalização e dispersão das nanopartículas. São abordados os modos de verificação da estabilidade coloidal da mistura e a metodologia empregue neste trabalho. Finalmente, caracterizam-se as propriedades termofísicas

dos nanofluidos produzidos, bem como as dos fluidos utilizados na caracterização do equipamento experimental.

No capítulo 4 caracteriza-se o dispositivo utilizado na caracterização da transferência de calor e apresenta-se a formulação matemática do problema em estudo, assim como o procedimento de cálculo das incertezas associadas aos resultados experimentais. Apresentam-se ainda os ensaios realizados para calibração e validação do modelo experimental e descreve-se a metodologia experimental a adotar na realização dos ensaios.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados experimentais e realiza-se uma análise paramétrica dos mesmos, procurando caracterizar o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos produzidos.

Finalmente, no capítulo 6, evidenciam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido nesta dissertação. São também propostos trabalhos a realizar no futuro, relacionados com o desenvolvimento de nanofluidos térmicos de MWCNT.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A intensificação da transferência de calor, imprescindível para responder às necessidades mundiais dos dias de hoje, pode ser conseguida através da melhoria das propriedades termofísicas dos fluidos de permuta convencionais que, por serem reduzidas, limitam os avanços tecnológicos dos sistemas de transferência de calor atuais.

No século XX, Ahuja, 1975, e Liu, Choi e Kasza, 1988, estudaram a influência da adição de partículas com dimensões milimétricas e micrométricas em fluidos convencionais, como forma de intensificar a transferência de calor e melhorar as propriedades termofísicas dos fluidos. Porém, apesar de se verificarem melhorias na transferência de calor, os autores concluíram, à semelhança de Maxwell, que a aplicação destes fluidos em sistemas reais não é possível, uma vez que conduzem a um aumento significativo das perdas de carga, ao mesmo tempo que provocam ações abrasivas sobre os componentes e tubagens (Ahuja, 1975; Das *et al.*, 2007; Hamilton e Crosser, 1962; Liu, Choi e Kasza, 1988).

Em 1995, Choi dispersou partículas de dimensão nanométrica em fluidos de transferência de calor convencionais, com o intuito de ultrapassar os obstáculos impostos à utilização de fluidos contendo partículas com dimensões superiores ao micrómetro. Estes apresentaram valores superiores das suas propriedades de transferência de calor, sobretudo de condutividade térmica, tendo sido denominados nanofluidos. Ao contrário do que se verificou nas investigações anteriores, os nanofluidos desenvolvidos por Choi apresentaram elevada estabilidade, menor desgaste das superfícies de transferência de calor e quedas de pressão desprezáveis (Choi, 1995).

Face aos resultados satisfatórios apresentados por Choi, os nanofluidos representaram o início da investigação de uma nova classe de fluidos térmicos que, além de apresentarem propriedades

termofísicas melhoradas, abrem todo um leque de perspectivas para inovar no que concerne tecnologias e sistemas, nomeadamente ao nível da miniaturização (Choi, 1995; Ding *et al.*, 2006; Gupta *et al.*, 2014).

2.1 NANOFLUIDOS

Os nanofluidos são aparentemente sistemas de duas fases, obtidos pela dispersão de materiais sólidos de dimensões nanométricas em fluidos de permuta convencionais. Estes, quando comparados com os fluidos base, apresentam valores superiores de algumas das suas propriedades termofísicas, sobretudo de condutividade térmica (Yu e Xie, 2012).

Além de melhor desempenho na transferência de calor, os nanofluidos possuem também propriedades mecânicas, óticas, magnéticas e elétricas superiores às dos respetivos fluidos base. Por estes motivos, os nanofluidos possuem potencial para aplicações em áreas como a transferência e armazenamento de energia, transferência de massa, e ainda em áreas como a mecânica ou biomecânica (Yu e Xie, 2012).

2.1.1 NANOPARTÍCULAS

As principais nanopartículas utilizadas na preparação de nanofluidos são compostas por metais, óxidos metálicos ou carbono, com dimensões entre 1-100nm. As nanopartículas metálicas mais comuns são compostas por cobre, níquel ou alumínio. Os óxidos de alumínio (Al_2O_3), titânio (TiO_2), cobre (CuO), silício (SiO_2) e ferro (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) são também alguns dos óxidos metálicos mais utilizados, enquanto as nanopartículas com base em carbono mais comuns são os nanotubos de carbono (CNT) e o grafeno. É ainda possível encontrar na literatura estudos que se debruçam sobre o estudo de nanofluidos com outras nanopartículas além das referidas (Gupta *et al.*, 2014; Pang, Lee e Kang, 2015).

As nanopartículas têm propriedades termofísicas diferentes das de um sólido maciço do mesmo material. Além disso, a sua composição química, tamanho e geometria têm também um papel importante nas suas características físicas, pois à nanoescala, a percentagem de átomos na superfície torna-se significativa (Duncan e Rouvray, 1989; Xuan e Li, 2000).

2.1.1.1 NANOTUBOS DE CARBONO

Um nanotubo de carbono (CNT) é um arranjo hexagonal de átomos de carbono enrolado, formando um cilindro oco, longo e fino. O seu comprimento é da ordem das centenas de nanómetros, mas pode atingir as dezenas de micrómetros (Wepasnick *et al.*, 2010). Existem duas formas estruturais de CNT, os nanotubos de parede única (*single-walled carbon nanotubes* – SWCNT) (Figura 2.1 (esq.)) e os nanotubos de paredes múltiplas (*multi-walled carbon nanotubes* – MWCNT) (Figura 2.1 (dir.)).

Os SWCNT possuem diâmetros compreendidos entre 1 e 10nm, e são geralmente fechados nas extremidades. Por outro lado, os diâmetros dos MWCNT são muito superiores, entre 5nm e algumas centenas de nanómetros, uma vez que a sua estrutura consiste em vários cilindros concêntricos, unidos pelas forças de *van der Waals*. Por este motivo, os CNT possuem elevadas razões de aspeto, isto é, a razão entre o comprimento e o diâmetro das nanopartículas.

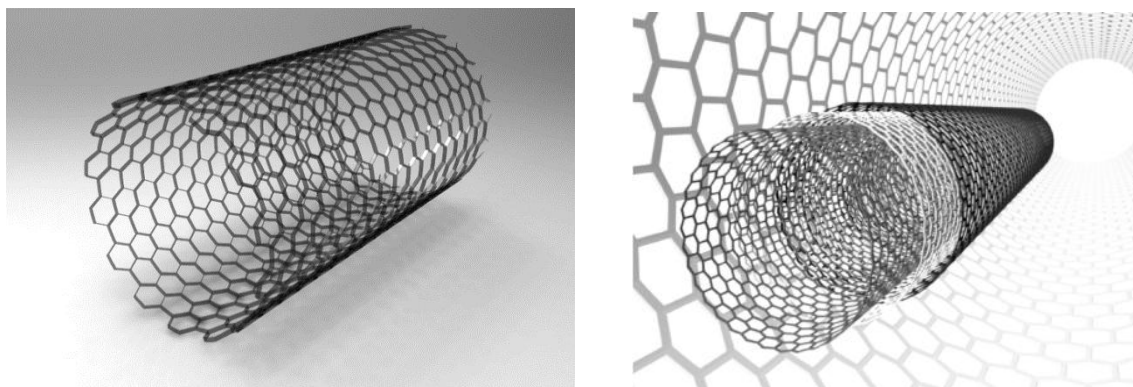


Figura 2.1 – Nanotubos de carbono de parede simples (esq.) e de parede múltipla (dir.) (Lamas, 2013).

Os CNT apresentam um comportamento semelhante ao de metais e semicondutores, detendo uma condutividade elétrica e térmica superiores à do cobre e diamante (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

A síntese de CNT pode ser conseguida por recurso a técnicas *bottom-up* ou *top-down*. As abordagens *top-down* utilizam materiais macroscópicos que são sucessivamente miniaturizados até se conseguirem estruturas de escala nanométrica, enquanto as técnicas *bottom-up* têm como ponto de partida os átomos e moléculas para construir as nanoestruturas (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

O método *CCVD* (*catalytic chemical vapor deposition*), que se inclui nas técnicas *bottom-up*, é o mais utilizado na produção de CNT. Este possibilita a síntese de CNT com comprimentos e diâmetros

controlados, através da manipulação do tempo da reação química, e da entidade molecular utilizada (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

Outras abordagens *bottom-up* comuns na produção de CNT são os métodos de descarga elétrica (*arc-discharge*) e a remoção por laser. A técnica de descarga elétrica é utilizada quando se pretendem CNT com diâmetros reduzidos e SWCNT. Contudo, esta técnica acarreta custos elevados por ser limitada à produção em pequena escala (Hernadi *et al.*, 1996; Keidar e Waas, 2004; Merchan-Merchan *et al.*, 2010; Murshed e Nieto de Castro, 2014; Schnitzler e Zarbin, 2008).

2.1.2 FLUIDOS BASE

Os CNT apresentam normalmente um excelente comportamento quando dispersos em fluidos de transferência de calor comuns como a água, o etilenoglicol, o óleo de silício e o óleo de motor (Murshed e Nieto de Castro, 2014).

A água é um dos fluidos mais comuns e o de menor custo, e possui melhor desempenho térmico do que o glicol ou o óleo de motor. Contudo, é frequente utilizar diluições de etilenoglicol e propileno glicol em água, pois previnem condições de possível congelação ou ebulição, sem contribuir para aumentos significativos nas necessidades de bombagem. Por estes motivos, muitas das investigações em nanofluidos de CNT, concentram-se na dispersão destas nanopartículas em água e etilenoglicol, utilizando a maioria MWCNT como fase dispersa ao invés de SWCNT (Fonseca *et al.*, 2013).

Ambos os glicóis têm propriedades de transferência de calor inferiores às da água e densidade superior, o que resulta em caudais ou áreas de transferência de calor mais elevados. De entre estes dois fluidos, as diluições de etilenoglicol em água são as mais utilizadas enquanto fluidos de transferência de calor providenciando uma solução de baixo custo e, por isso, são também favorecidas na seleção dos fluidos base para nanofluidos térmicos de CNT (Fonseca *et al.*, 2013).

2.2 PREPARAÇÃO DE NANOFLUIDOS

Na produção de nanofluidos, os principais aspetos a considerar são os materiais das nanopartículas e os líquidos base, embora este processo pressuponha o controlo minucioso de um conjunto de parâmetros importantes por forma a conseguir fluidos térmicos funcionais (Gupta *et al.*, 2014). É essencial que as nanopartículas apresentem uma elevada dispersão e compatibilidade química com o fluido base selecionado, para que o resultado seja uma suspensão estável, uniforme e duradoura, sem a presença de aglomerados ou alteração química do fluido (Duangthongsuk e Wongwises, 2008; Fonseca *et al.*, 2013; Gupta *et al.*, 2014).

Existem diferentes processos que podem ser adotados para produzir nanofluidos, os quais são geralmente distinguidos entre métodos de passo único e métodos de dois passos.

2.2.1 MÉTODOS DE PASSO ÚNICO

Os métodos de passo único consistem na síntese das nanopartículas diretamente no fluido base, ou seja, na produção de nanopartículas e subsequente dispersão no fluido.

Em 1978, Akoh *et al.* propuseram uma técnica de passo único denominada evaporação direta a vácuo (VEROS – *vacuum evaporation onto a running oil substrate*), que consiste na evaporação das nanopartículas numa câmara de vácuo, através de um feixe de eletrões com o auxílio da rotação de um disco coberto por óleo (Akoh *et al.*, 1978).

Em 1997, foi proposta uma técnica VEROS modificada, na qual se utiliza pulverização catódica a alta pressão na preparação de suspensões com partículas metálicas (Wagener, Murty e Guenther, 1997).

Em 2005, Lo *et al.* aplicaram um método denominado síntese de nanopartículas com arco submerso a vácuo (SANSS – *vacuum-submerged arc nanoparticles synthesis system*) na produção de nanofluidos com partículas de cobre e fluidos base dielétricos, registando-se uma diminuição da aglomeração das nanopartículas, o que se revelou interessante na promoção da estabilidade da mistura (LO, TSUNG e CHEN, 2005; Yu e Xie, 2012).

Apesar dos métodos de passo único proporcionarem melhor dispersão e estabilidade da mistura, estes são pouco utilizados devido à sua elevada complexidade (Murshed e Nieto de Castro, 2014). A secagem, armazenamento e transporte das nanopartículas são evitados de forma a minimizar a sua aglomeração e a aumentar a sua estabilidade no seio do fluido (Li *et al.*, 2009).

Por outro lado, as técnicas de passo único recorrem a transformações físicas que implicam custos elevados. Ainda assim, a maior desvantagem destes métodos é o facto de se verificar a presença de impurezas nos nanofluidos devido a reações incompletas, dificultando a compreensão do contributo real das nanopartículas no desempenho dos nanofluidos (Gupta *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2011; Yu e Xie, 2012). Desta forma, dadas as particularidades destes métodos, a sua expansão à escala industrial é inviável, limitando a sua aplicabilidade (Li *et al.*, 2009).

2.2.2 MÉTODOS DE DOIS PASSOS

Nos métodos de dois passos, as nanopartículas são primeiro produzidas sob a forma de pós secos e, posteriormente, dispersas num fluido. Estes são os métodos mais utilizados, uma vez que os processos de síntese das nanopartículas se encontram estabelecidos a nível industrial, o que permite a sua produção em grande escala e de forma económica (Yu e Xie, 2012). A posterior dispersão das nanopartículas no fluido base é geralmente conseguida com o auxílio de agitação por ultrassons ou induzida por forças magnéticas (Gupta *et al.*, 2014).

A dispersão das nanopartículas de CNT no fluido base é um procedimento de extrema importância, o qual comprometerá as características termofísicas do nanofluido final, assim como a estabilidade da mistura, assunto que será apresentado a seguir.

2.3 ESTABILIDADE DOS NANOFUIDOS

A estabilização da mistura coloidal é um processo delicado e cujo propósito é evitar a aglomeração das nanopartículas no seio do fluido base. A agregação das partículas promove a criação de sedimentos, alterando as propriedades do nanofluido. Esta pode ainda provocar o entupimento dos canais de escoamento, sendo fundamental evitar a sua ocorrência. Neste sentido, foram

desenvolvidas técnicas que previnem a aglomeração das nanopartículas e que permitem aferir estabilidade à mistura (Gupta *et al.*, 2014).

A teoria da estabilidade coloidal dos nanofluidos DVLO (Durjsnguin, Verway, Landan e Overback) sugere que a estabilidade de uma solução é determinada pelo equilíbrio das forças de *van der Waals*. Estas forças surgem das interações entre partículas, e são intensificadas quando as nanopartículas possuem razões de aspeto elevadas, como é o caso dos CNT (Missana e Adell, 2000; Popa *et al.*, 2010; Yu e Xie, 2012). Deste modo, se as forças atrativas forem superiores às repulsivas, as partículas irão colidir, formando agregados (Yu e Xie, 2012).

Além de forças de *van de Waals* atrativas elevadas, os CNT apresentam características hidrofóbicas, que reforçam a tendência para a criação de aglomerados. Assim, os modos de estabilização da mistura assentam na intensificação das forças de repulsão entre as nanopartículas, e na transformação das suas superfícies hidrofóbicas em hidrofílicas, o que pode ser conseguido através de técnicas mecânicas e químicas, que se apresentam de seguida (Yu e Xie, 2012).

2.3.1 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

As técnicas de estabilização química dos nanofluidos podem dividir-se em estabilização estereoquímica e electrostática. A estabilização estereoquímica corresponde ao rearranjo espacial dos átomos numa molécula. A electrostática, onde se inclui a funcionalização covalente, consiste na adição de grupos iónicos às superfícies das nanopartículas (Yu e Xie, 2012).

2.3.1.1 ESTABILIZAÇÃO ESTEREOQUÍMICA

As técnicas de estabilização estereoquímica incluem o controlo do pH da mistura e a adição de agentes de ativação das superfícies, denominados dispersantes ou reagentes (Gupta *et al.*, 2014). Os dispersantes contêm nanopartículas carregadas, que repelem as forças de atração de *van der Waals*, e são constituídas por uma cadeia hidrofóbica e por uma cadeia polar hidrofílica (Yu e Xie, 2012).

Num sistema de duas fases, como é o caso dos nanofluidos, o dispersante tende a localizar-se na zona de contacto entre as fases, introduzindo um nível de continuidade entre as partículas e o fluido

base. Em resultado, a natureza hidrofóbica das partículas é modificada para hidrofílica, prevenindo a sua agregação (Fonseca *et al.*, 2013; Yu e Xie, 2012).

A seleção de um dispersante adequado à mistura é um assunto de elevada importância. Os dispersantes podem ter uma natureza iónica ou não-iónica. (Ilyas, Pendyala e Marneni, 2014; Yu e Xie, 2012). Para dispersantes não iónicos, deve avaliar-se a sua solubilidade através do valor do balanço hidrofílico/lipofílico, designado por HLB (*Hydrophilic-Lipophilic Balance*), que pode ser encontrado em livros da especialidade como o de Kronberg, Holmberg e Lindman, 2014. Geralmente, quando o fluido base é um solvente polar, são escolhidos dispersantes solúveis em água; caso contrário, deve optar-se por dispersantes solventes em óleo (Yu e Xie, 2012).

Nos trabalhos experimentais desenvolvidos presentes na literatura, têm sido utilizados diversos dispersantes na produção de nanofluidos de CNT, nomeadamente dodecilsulfato de sódio (SDS, $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$, *sodium lauryl sulfate*), brometo de cetrimónio (CTAB, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$, *hexadecyltrimethyl ammonium bromide*), hexametildissiloxano (HMDSO, $\text{O}[\text{Si}(\text{CH}_3)_3]_2$, *hexamethyldisiloxane*), dodecilbenzenossulfonato de sódio (SDBS, $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$, *sodium dodecylbenzene sulfonate*), polivinilpirrolidona (PVP, $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, *polyvinylpyrrolidone*) e goma arábica (GA) (Garg *et al.*, 2009; Ilyas, Pendyala e Marneni, 2014).

Em 2007, Hwang *et al.* utilizaram o dispersante SDS durante a preparação de nanofluidos de MWCNT de base aquosa, com o objetivo de diminuir o entrançamento dos nanotubos no seio do fluido (Hwang *et al.*, 2007).

Em 2011, Rashmi *et al.* adicionaram GA em nanofluidos de CNT e constataram melhorias consideráveis da estabilidade da dispersão e da condutividade térmica do nanofluido (Rashmi *et al.*, 2011). Por outro lado, a GA mostrou ser um dispersante com melhor desempenho do que SDS e CTAC para algumas dispersões de CNT em água de-ionizada (Bandyopadhyaya *et al.*, 2002).

Numa perspetiva geral, a adição de dispersantes produzem resultados satisfatórios na alteração das propriedades das superfícies das nanopartículas e também na redução de aglomerados, possibilitando a obtenção de suspensões estáveis (Gupta *et al.*, 2014). No entanto, os resultados de investigações já publicadas indicam que o SDBS não é um dispersante adequado para nanofluidos sujeitos a elevadas temperaturas (Wen e Ding, 2004).

Apesar da adição de dispersantes ser um método eficaz para melhorar a dispersão das nanopartículas no fluido base, a sua presença pode originar vários inconvenientes que são necessários contornar. Estes incluem a contaminação do processo de transferência de calor dos nanofluidos e a produção de espumas quando aquecidos. A utilização de dispersantes pode também contribuir para o aumento da resistência térmica entre as nanopartículas e o fluido, o que resulta numa melhoria efetiva da condutividade térmica inferior à esperável (Yu e Xie, 2012).

2.3.1.2 ESTABILIZAÇÃO ELECTROESTÁTICA

As técnicas de modificação química da superfície sem recurso a dispersantes, ou seja, com o uso de nanopartículas funcionalizadas, é uma abordagem promissora para alcançar estabilidade de longa duração de um nanofluido, e contornar os inconvenientes dos dispersantes.

Das técnicas de modificação de superfícies, a funcionalização covalente é um método comum para assegurar a estabilidade dos CNT no seio do fluido base. Esta envolve a incorporação direta de novos elementos na superfície das nanopartículas que, tal como os dispersantes, converte-as em hidrofílicas. A modificação das superfícies possibilita a oxigenação dos grupos funcionais como os grupos carboxílicos e álcoois, alterando o pH da mistura (Esumi *et al.*, 1996; Naseh *et al.*, 2010; Xie e Chen, 2011; Xie *et al.*, 2003).

Segundo Nasiri *et al.*, os nanofluidos de CNT funcionalizados apresentaram melhor estabilidade, assim como uma condutividade térmica mais elevada quando comparados com nanofluidos de CNT, aos quais haviam sido adicionados dispersantes (Nasiri *et al.*, 2011).

Apesar da funcionalização covalente ser uma alternativa eficaz à utilização de dispersantes, estes tratamentos químicos também podem causar o encurtamento dos CNT, dependendo da extensão e intensidade da reação química (Gupta *et al.*, 2014; Lamas, 2013).

2.3.2 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

As técnicas de estabilização mecânica incluem geralmente a aplicação de ultrassons que criam ondas de pressão e induzem cavitação. Este fenómeno resulta na geração de cargas electroestáticas na superfície das nanopartículas, e se traduz em forças de repulsão, promovendo a estabilidade cinética, impedindo a formação de agregados. Contudo, estes métodos são sensíveis aos valores de

pH da mistura e, por isso, de uso limitado (Fonseca *et al.*, 2013). Outra desvantagem destes procedimentos é a degradação das nanopartículas que, para os CNT, representa uma redução de comprimento até 65% (Hilding *et al.*, 2003).

A Tabela 2.1 apresenta os resultados de algumas das investigações desenvolvidas no âmbito da produção de nanofluidos de CNT, nomeadamente o tipo de nanopartículas e de fluido base, o método de produção utilizado e o modo de estabilização adotado. Como se pode verificar, na maioria das investigações os nanofluidos foram produzidos com recurso a métodos de dois passos, fluidos de base aquosa e etilenoglicol, e MWCNT como fase dispersa. Os modos de estabilização mais adotados são a adição de dispersantes ou a funcionalização covalente.

Tabela 2.1 – Métodos de produção utilizados nas principais investigações envolvendo nanofluidos com partículas de CNT, onde as siglas representam: A - água, EG – etilenoglicol, OM – óleo de motor, OS – óleo de silicone, A+EG – água e etilenoglicol, R113 – fluido refrigerante R113.

Investigação	Nanofluido	Método de produção	Dispersante/tratamento das superfícies
(Xie e chen, 2011)	MWCNT/EG	Dois passos	Dispersante 12-3-12, 2Br-1
(Choi et al., 2001)	MWCNT/óleo alceno	Dois passos	Nenhum
(Xie et al., 2003)	MWCNT/A	Dois passos	Tratamento da superfície
(Chen et al., 2008)	MWCNT/A/EG	Dois passos	Tratamento da superfície
(Assael et al., 2004)	MWCNT/A	Dois passos	Dispersante SDS
(Ding et al., 2006)	CNT/A	Dois passos	Dispersante GA
(Hwang et al., 2006)	MWCNT/A	Dois passos	Dispersante SDS
(Liu, Lin e Wang, 2011; Liu <i>et al.</i> MWCNT/EG/A 2005)	MWCNT/EG/A	Dois passos	Nenhum
(Liu et al., 2005)	MWCNT/O,	Dois passos	Dispersante NHS
(Amrollahi, Hamidi e Rashidi, 2008)	SWCNT/EG	Dois passos	Nenhum
(Chen e Xie, 2009)	MWCNT/OS	Dois passos	HMDS/Funcionalização
(Aravind et al., 2011)	MWCNT/A/EG	Dois passos	Funcionalização
(Jung, Oh e Kwak, 2009)	MWCNT/A	Dois passos	Dispersante PVP
(Kathiravan et al., 2011)	MWCNT/A	Um passo	Dispersante SDS
(Assael et al., 2006)	MWCNT/EG	Dois passos	Dispersante SDS
(Assael et al., 2006)	MWCNT/A	Dois passos	CTAB e Triton X-100
(Teng e Yu, 2013)	MWCNT/A+EG	Dois passos	Dispersante Chitosan
(Jiang, Ding e Peng, 2009)	CNT/R113	Um passo	Nenhum
(Kim, Ma e Yu, 2010)	MWCNT/A	Dois passos	Tratamento de plasma dos MWCNT
(Nasiri et al., 2011)	MWCNT/A	Dois passos	Funcionalização/SDS

Apesar de a estabilização química ser o modo de estabilização de mistura mais comum, é frequente a aplicação de ultrassons no momento da dispersão das nanopartículas no fluido base. Este procedimento é adotado para garantir que os aglomerados de partículas sejam quebrados no seio do fluido base (Lamas, 2013).

O tempo e quantidade de energia de ultrassons varia de acordo com as investigações presentes na literatura, mas é dependente de fatores como a concentração de nanopartículas e o tipo de fluido base, assim como a potência, frequência ou outras especificações técnicas do aparelho de ultrassons. Alguns autores afirmam ainda que o tempo e energia de ultrassons também afetam a condutividade dos nanofluidos (Das, Choi e Patel, 2006; Murshed, Leong e Yang, 2008; Xie e Chen, 2011).

2.3.3 MÉTODOS DE AVERIGUAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS NANOFLUIDOS

Após a estabilização dos nanofluidos, pode ser necessário proceder à avaliação da sua qualidade. Os métodos mais utilizados na verificação da estabilidade dos nanofluidos são: o método da sedimentação, a análise do potencial zeta, a análise da absorção espectral e o método com recurso ao analisador *LUMiSizer*.

O método da sedimentação é o mais simples para averiguação da estabilidade dos nanofluidos. Neste, os nanofluidos são considerados estáveis quando a concentração e tamanho das nanopartículas se mantiver constante (Yu e Xie, 2012). A concentração de nanopartículas sedimentadas no seio da mistura, que se encontra sob a ação de um campo de forças externas, é obtida com um dispositivo experimental específico, e resulta da comparação de várias medições de concentração (Li *et al.*, 2009).

A variação de concentração das partículas também pode ser averiguada por espectrofotometria por radiação ultravioleta e visível, que mede a percentagem de absorção ou transmitância de uma dispersão. Este procedimento é o princípio base do método da análise da absorção espectral e permite conhecer a concentração da mistura, uma vez que existe uma relação linear entre a absorção de radiação pelas nanopartículas e a concentração dos nanofluidos. Este método tem como grande vantagem, face aos restantes, a possibilidade de quantificar a concentração dos nanofluidos (Yu e Xie, 2012). Contudo, não permite prever a sedimentação a longo prazo (Kim, Bang e Onoe, 2009).

O potencial zeta é um indicador de estabilidade da mistura coloidal, que representa a diferença de potencial entre o meio de dispersão e a camada estacionária de fluido adjacente às partículas. Desta forma, quando um nanofluido possui um potencial zeta superior a 25mV, as nanopartículas possuem um grau de repulsão elevado, e pode considerar-se que a solução é estável. Por oposição, se o valor do potencial zeta for inferior a 25mV, as misturas tendem a formar sedimentos (Yu e Xie, 2012).

Os métodos apresentados possuem alguns inconvenientes, uma vez que são relativamente lentos, e requerem geralmente a diluição das suspensões, alterando as interações entre as partículas e, conseqüentemente, os resultados (Lamas *et al.*, 2012).

A tecnologia *LUMiSizer*, reportada em (Lamas, 2013), permite avaliar a estabilidade dos nanofluidos de MWCNT sem a necessidade de diluir as suspensões. Neste método, as amostras são submetidas a três campos de centrifugação (RCFs), provocando a aceleração da sedimentação das nanopartículas a diferentes taxas. A aplicação dos diferentes RCFs possibilita o cálculo de uma constante de proporcionalidade entre estes e a velocidade de sedimentação, e deste modo determinar o tempo útil de estabilidade do nanofluido (Lamas *et al.*, 2012).

2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

As propriedades dos fluidos com maior relevância no processo de transferência de calor por convecção são a densidade, a viscosidade, a condutividade térmica e o calor específico. Para os fluidos de permuta convencionais, estas propriedades são bem conhecidas e encontram-se tabeladas. Contudo, o mesmo não acontece para os nanofluidos, sendo por isso necessário compreender o seu contributo no desempenho da transferência de calor.

2.4.1 DENSIDADE

A densidade, ou massa volúmica, define-se como o quociente entre a massa e o volume de uma substância, e é uma importante propriedade termofísica na transferência de calor por convecção, pois influencia as necessidades de bombagem dos sistemas de permuta de calor (Incropera *et al.*, 2007). Contudo, os trabalhos de investigação desenvolvidos sobre a densidade dos nanofluidos são

muito reduzidos, quando comparados com os estudos existentes sobre as restantes propriedades termofísicas, como a condutividade térmica ou a viscosidade.

A densidade dos nanofluidos é proporcional à fração volúmica de nanopartículas e de fluido base no sistema. Uma vez que a densidade dos sólidos é mais elevada do que a dos líquidos, em geral a densidade do nanofluido aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas (Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012).

Na ausência de dados experimentais, a densidade dos nanofluidos (ρ_{nf}) pode ser calculada de acordo com a teoria de mistura, utilizando a correlação proposta por Pak e Cho:

$$\rho_{nf} = \emptyset \rho_p + (1 - \emptyset) \rho_{fb} \quad 2.1$$

em que \emptyset é a fração volúmica das nanopartículas, ρ_p é a densidade das nanopartículas e ρ_{fb} é a densidade do fluido base. Esta correlação evidencia a dependência linear da densidade de um nanofluido com a fração volúmica de nanopartículas (Pak e Cho, 1998).

Sommers e Yerkes mediram a densidade do nanofluido de Al_2O_3 em propanol à temperatura ambiente, utilizando duas metodologias diferentes. Na primeira foi utilizado um densímetro para medir a densidade de uma amostra de fluido. No segundo método foi produzida uma amostra de fluido com um volume conhecido, e a sua massa foi medida numa balança de elevada precisão. Os dados recolhidos pelos dois métodos foram comparados, tendo-se observado uma relação quase linear entre a densidade e a concentração de partículas (Sommers e Yerkes, 2009).

Eastman *et al.* verificaram que, para nanofluidos com frações volúmicas inferiores a 1%, o erro entre a previsão da densidade e o resultado experimental é inferior a 5%, apresentando-se válida a previsão teórica para estas condições (Eastman *et al.*, 2004).

Na ausência de trabalhos substanciais sobre a densidade de nanofluidos, novos trabalhos de investigação são necessários para verificar a validade desta correlação, e mostrar os limites da aplicabilidade e robustez na caracterização de um nanofluido genérico.

2.4.2 CALOR ESPECÍFICO

O calor específico define-se como a variação térmica de uma substância quando sujeita a uma determinada quantidade de calor. Esta permite conhecer a quantidade de energia que um corpo consegue transmitir a outro corpo (Incropera *et al.*, 2007).

2.4.2.1 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

Segundo as investigações experimentais presentes na literatura, o calor específico dos nanofluidos depende de diversos fatores, nomeadamente, a concentração volúmica, tipo e dimensões das nanopartículas, a temperatura e o tipo de fluido base utilizado (Shahrul *et al.*, 2014).

O calor específico da maioria dos nanofluidos comuns diminui com o aumento da fração volúmica (Ashtiani, Akhavan-Behabadi e Pakdaman, 2012; Choi e Zhang, 2012; Ghozatloo, Rashidi e Shariaty-Niassar, 2014; Kulkarni *et al.*, 2008; Murshed, 2011, 2012; Namburu *et al.*, 2007; Pak e Cho, 1998; Strandberg e Das, 2010; Zhou e Ni, 2008). Por outro lado, considerando o mesmo tipo de nanofluidos, verifica-se um maior calor específico com o aumento do diâmetro das nanopartículas (Shahrul *et al.*, 2014; Wang, Zhou e Peng, 2006).

Existem resultados contraditórios sobre os efeitos da temperatura no calor específico dos nanofluidos. Algumas investigações mostram que o calor específico diminui com o aumento da temperatura para os nanofluidos analisados (Ho e Pan, 2014; Robertis, De *et al.*, 2012; Saeedinia, Akhavan-Behabadi e Nasr, 2012; Shin e Banerjee, 2011; Vajjha e Das, 2012). Contudo, Kumaresan e Velraj verificaram que, para nanofluidos de MWCNT em diluições de 30% de etilenoglicol e 70% água destilada, o calor específico aumenta com o aumento da temperatura, mas decresce com o aumento da concentração volúmica de MWCNT. Por outro lado, verificou-se que o aumento do calor específico com a temperatura atinge um máximo, sendo possível observar um ligeiro decréscimo do valor desta propriedade termofísica para temperaturas acima desse valor (Kumaresan e Velraj, 2012).

O aumento do calor específico com a temperatura também foi registado noutros nanofluidos com MWCNT (Fakoor Pakdaman, Akhavan-Behabadi e Razi, 2012). Esta tendência foi ainda verificada para nanofluidos com nanopartículas de cobre em etilenoglicol (Robertis, De *et al.*, 2012).

Estudos publicados mostram que, geralmente, o calor específico dos nanofluidos aumenta em comparação com os fluidos base, após a adição de agentes dispersantes nas misturas, em particular quando utilizado *Chitosan* (Shahrul *et al.*, 2014; Teng e Hung, [s.d.]; Teng e Yu, 2013). Alguns autores consideraram que esta tendência poderia dever-se ao facto de tanto o dispersante como os MWCNT possuírem valores superiores e inferiores de calor específico, respetivamente, quando comparados com fluidos base de etilenoglicol em água. Contudo, os autores afirmam que estas observações não devem ser entendidas como conclusões sólidas, embora seja um aspeto relevante e que deve ser estudado com maior profundidade (Murshed e Nieto de Castro, 2014)

O calor específico dos nanofluidos pode ser maior ou menor que os respetivos fluidos base, uma vez que este depende do tipo e concentração volúmica de nanopartículas, da temperatura e do tipo de fluido base (Shahrul *et al.*, 2014).

He *et al.* apontaram duas razões que afetam o calor específico de materiais compósitos (He *et al.*, 2012). Se o calor específico das nanopartículas for menor que o do fluido base, o calor específico da suspensão irá diminuir, como se verifica em nanofluidos de Al_2O_3 em água ou etilenoglicol (He *et al.*, 2012; Shahrul *et al.*, 2014). Caso contrário irá aumentar, como acontece com nanofluidos de CNT em etilenoglicol, cujo calor específico das nanopartículas é superior ao do fluido base (Amrollahi, Hamidi e Rashidi, 2008). Por outro lado, a energia livre das interações sólido-líquido é alterada com as nanopartículas em suspensão (He *et al.*, 2012).

2.4.2.2 MODELOS TEÓRICOS

Na determinação experimental do calor específico dos nanofluidos são normalmente utilizados calorímetros de medição diferencial (DSC – *differential scanning calorimeter*) (Robertis, De *et al.*, 2012; Shahrul *et al.*, 2014; Starace *et al.*, [s.d.]; Zhou e Ni, 2008). Porém, existem modelos teóricos na literatura que permitem estimar o calor específico de um nanofluido.

As correlações matemáticas mais utilizadas são: a equação de Pak e Cho, designada comumente como modelo I, e a de Xuan e Roetzel, conhecida como modelo II, e que resulta de uma adaptação do modelo I. As equações 2.2 e 2.3 representam as correlações correspondentes aos modelos I e II, respetivamente,

$$C_{p_{nf}} = \phi C_{p_p} + (1 - \phi) C_{p_{fb}} \quad 2.2$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi(\rho C_p)_p + (1 - \phi)(\rho C_p)_{fb} \quad 2.3$$

onde $C_{p_{nf}}$ é o calor específico do nanofluido, C_{p_p} é o calor específico das nanopartículas e $C_{p_{fb}}$ é o calor específico do fluido base (Pak e Cho, 1998; Xuan e Roetzel, 2000).

Alguns autores procuraram validar os modelos teóricos I e II, procedendo a sucessivas medições de calor específico para diferentes tipos de nanofluidos e concentrações de nanopartículas, concluindo que o modelo II possibilita o cálculo do calor específico com rigor (Shahrul *et al.*, 2014). Contudo, Vajjha e Das consideraram que os valores medidos de calor específico não poderiam ser previstos pelos modelos anteriores, tendo proposto uma nova correlação, que considera como variáveis: a concentração volúmica das nanopartículas, a temperatura e a capacidade calorífica das partículas e do fluido base (Vajjha e Das, 2012, 2009).

Além destes, outros modelos foram propostos ao longo dos anos (Ghazvini *et al.*, 2012; Kumaresan e Velraj, 2012; Sekhar e Sharm, [s.d.]; Shin e Banerjee, 2011; Shokouhmand, Ghazvini e Shabanian, [s.d.]), incluindo uma correlação com base no método dos mínimos desvios quadráticos, com o objetivo de descrever o calor específico de nanofluidos de MWCNT em óleo (Fakoor Pakdaman, Akhavan-Behabadi e Razi, 2012).

2.4.3 VISCOSIDADE

A viscosidade descreve a resistência interna de um fluido ao escoamento quando sujeito a uma taxa de corte, medindo indiretamente a taxa de tensão-deformação de um fluido (Nguyen *et al.*, 2007). Esta propriedade termofísica influencia o projeto de sistemas de transferência de calor, nomeadamente no que concerne as necessidades de potência de bombagem (Mahbubul, Saidur e Amalina, 2012).

Os fluidos podem apresentar diferentes comportamentos reológicos, dividindo-se em comportamento Newtoniano e não Newtoniano. Um fluido Newtoniano possui uma relação linear entre a tensão tangencial e a taxa de corte a que está sujeito, ou seja, é aquele cuja viscosidade se mantém constante com a variação da taxa de corte. Por outro lado, são considerados fluidos não Newtonianos, aqueles em que essa relação não é linear.

2.4.3.1 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

A viscosidade dos nanofluidos pode ser medida experimentalmente utilizando viscosímetros rotacionais. De entre os existentes, a utilização de um recipiente de amostragem cilíndrico com um fuso concêntrico, e um banho térmico para controlo de temperatura da amostra permite realizar medições de viscosidade a diferentes taxas de corte e temperaturas (Garg *et al.*, 2009).

Embora a viscosidade seja uma propriedade termofísica bastante relevante na transferência de calor, muito poucas investigações foram já realizadas sobre o comportamento reológico de nanofluidos de CNT. Porém, existem estudos na literatura que procuram retratar o comportamento reológico de outros tipos de nanofluidos, cujo contributo é importante.

Segundo os estudos já desenvolvidos, é possível constatar que o comportamento reológico dos nanofluidos e, em particular a viscosidade, varia consoante diversos fatores, sendo os mais relevantes a concentração e geometria das nanopartículas, o tipo de fluido base, a temperatura e a taxa de corte aplicada ao nanofluido. Contudo, verificam-se algumas inconsistências entre os resultados das investigações publicadas.

Por exemplo, alguns autores afirmaram que os nanofluidos se comportam como fluidos Newtonianos (Chandrasekar, Suresh e Chandra Bose, 2010; Chen *et al.*, 2007, 2009; He *et al.*, 2007; Ko *et al.*, 2007; Kulkarni, Das e Vajjha, 2009; Namburu *et al.*, 2007; Prasher *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2005), enquanto outros observaram um comportamento não Newtoniano (Chen *et al.*, 2008, 2009, 2009; Garg *et al.*, 2009; Kole e Dey, 2010; Phuoc, Massoudi e Chen, 2011).

Em 2012, Aladag *et al.* investigaram experimentalmente a viscosidade de nanofluidos de CNT e nanofluidos de Al₂O₃ em base aquosa a baixas temperaturas, tendo registado que os nanofluidos apresentam um comportamento Newtoniano ou não Newtoniano, dependendo da taxa de corte aplicada (Aladag *et al.*, 2012).

A maioria das investigações relata que a viscosidade do nanofluido diminui não linearmente, ou exponencialmente, com o aumento da temperatura (Anoop *et al.*, 2009; Duangthongsuk e Wongwises, 2009; Kole e Dey, 2010; Kulkarni, Das e Vajjha, 2009; Lee *et al.*, 2011; Naik *et al.*, 2010; Namburu *et al.*, 2007, 2007; Nguyen *et al.*, 2007, 2008; Turgut *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2005). Porém, as investigações levadas a cabo por Prasher *et al.* e Chen *et al.* contradizem todas as anteriores, uma vez que a viscosidade dos nanofluidos estudados se revelou independente da temperatura

(Chen, Ding e Tan, 2007; Chen *et al.*, 2007; Prasher *et al.*, 2006)(Prasher *et al.*, 2006). No entanto, trabalhos mais recentes não parecem ir ao encontro das conclusões apresentadas por estes autores (Mahbubul, Saidur e Amalina, 2012).

O efeito do tamanho de partícula na viscosidade dos nanofluidos não é ainda consensual entre a comunidade científica. (Prasher *et al.*, 2006) afirmam que as dimensões das partículas não têm um efeito significativo na viscosidade. No entanto, a maioria dos investigadores demonstraram que o tamanho e forma das partículas influenciam sim a viscosidade dos nanofluidos. Em alguns estudos, verificou-se o aumento da viscosidade com a diminuição do tamanho das nanopartículas (Anoop, Sundararajan e Das, 2009; Chevalier, Tillement e Ayela, 2007; Lu e Fan, 2008; Namburu *et al.*, 2007; Pastoriza-Gallego *et al.*, 2011), enquanto outras investigações apontaram para uma tendência inversa (He *et al.*, 2007; Nguyen *et al.*, 2007, 2008).

Atualmente, a informação presente na literatura sobre a viscosidade dos nanofluidos é consistente na medida em que a viscosidade aumenta com o aumento da concentração volúmica das nanopartículas. Contudo, alguns investigadores mostraram que a viscosidade aumenta linearmente com o aumento da concentração volúmica (Garg *et al.*, 2008; Prasher *et al.*, 2006), enquanto outros mostraram que a tendência não é linear (Chen, Ding e Tan, 2007; Chen *et al.*, 2007, 2009; Duangthongsuk e Wongwises, 2009; He *et al.*, 2007; Nguyen *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2010).

Embora se verifiquem inconsistências na literatura, foram já propostos possíveis mecanismos responsáveis pelo comportamento da viscosidade dos nanofluidos. Estes incluem as interações hidrodinâmicas entre as partículas, o aumento da superfície destas, o aumento da taxa de dissipação de energia e os efeitos combinados das forças viscosas e da agregação das partículas (Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012).

2.4.3.2 MODELOS TEÓRICOS

Apesar de existir ainda muita controvérsia acerca do comportamento da viscosidade dos nanofluidos, tem existido um esforço por parte da comunidade científica no desenvolvimento de modelos que permitam prever o seu comportamento reológico.

Einstein propôs um dos primeiros modelos para misturas de partículas sólidas em líquidos, que relaciona a viscosidade do fluido base com a fração volúmica das partículas sólidas (Lamas, 2013).

Os modelos e formulações atuais reproduzem a variação da viscosidade para pequenas concentrações volúmicas, baseando-se nos princípios do modelo de Einstein, no entanto os estudos falham por não abordarem a influência dos diversos fatores de controlo, nomeadamente patamares de temperatura (Khanfer e Vafai, 2011).

Em contrapartida, nenhum dos modelos existentes na literatura foi desenvolvido com o objetivo de descrever nanofluidos com partículas com geometria tubular, embora alguns, em particular o modelo de Yiamsawas, preverem com erros inferiores a 20% a viscosidade de nanofluidos de MWCNT em diluições de etilenoglicol e água, para concentrações inferiores a 1% e temperaturas até 50°C (Afonso, 2015). Neste modelo, a viscosidade do nanofluido depende da concentração das nanopartículas e da viscosidade do fluido base, mas também considera a temperatura como variável, o que não acontece na maioria dos modelos preditivos existentes (Yiamsawas *et al.*, 2013).

Atualmente, nenhum modelo consegue estimar com precisão a viscosidade de um nanofluido genérico num intervalo relativamente amplo de concentrações de nanopartículas, nem prever o seu comportamento reológico, ou seja, um modelo que consiga relacionar com precisão o comportamento da viscosidade com a temperatura (Afonso, 2015). Desta forma, é ainda necessário intensificar a investigação destes fenómenos, de modo a compreender por completo os mecanismos inerentes ao comportamento reológico dos nanofluidos.

2.4.4 CONDUTIVIDADE

A condutividade térmica representa a taxa temporal de transmissão de energia sob a forma de calor através de uma substância, e é a propriedade termofísica dos nanofluidos que tem merecido mais atenção por parte da comunidade científica (Incropera *et al.*, 2007).

2.4.4.1 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

Na medição da condutividade térmica de líquidos é necessário estabelecer um campo de temperaturas unidimensional uniforme e as medições devem ser realizadas durante um intervalo de tempo reduzido. Estes requisitos são necessários de modo a garantir que não se formam correntes de convecção, ao mesmo tempo que o aquecimento do líquido deve ocorrer a partir de cima, de modo a facilitar a condução de calor por camadas (Fonseca *et al.*, 2013).

As técnicas mais comuns para a medição da condutividade térmica dos nanofluidos são o método de fio quente transiente, o método de prato paralelo em estado estacionário, o método de oscilação da temperatura e o método 3- ω (Fonseca *et al.*, 2013).

Dos métodos existentes, o método de fio-quente transiente (FQT) é o mais utilizado (Paul *et al.*, 2010). Este consiste na medição da temperatura e tempo de resposta de um fio de platina, que atua como sonda, quando sujeito a uma descarga elétrica repentina (Paul *et al.*, 2010; Peñas, Ortiz de Zárate e Khayet, 2008). Contudo, a aplicação direta deste método na determinação da condutividade térmica dos nanofluidos é difícil, uma vez que os nanofluidos são condutores elétricos (Paul *et al.*, 2010).

Na utilização do FQT para caracterizar fluidos eletricamente condutores, é necessário revestir o fio para possibilitar a medição da condutividade, para que a corrente elétrica não flua através deles. O método FQT revestido foi utilizado por Eastman *et al.* para medir a condutividade térmica de nanofluidos de Cu em etilenoglicol (Eastman *et al.*, 2001). Este método é amplamente utilizado pela comunidade científica para caracterizar nanofluidos, através dos analisadores comerciais KD2 e KD2-Pro, que possuem uma precisão aceitável (Lamas, 2013). Porém, Ju *et al.* demonstraram que as medições obtidas pelo método FQT apresentam valores errôneos quando realizadas imediatamente após a aplicação de ultrassons (Ju, Kim e Hung, 2008).

Nasiri *et al.* investigaram a condutividade térmica de vários tipos de nanofluidos de CNT usando métodos diferentes de dispersão: funcionalização e ultrassons. Os resultados demonstraram que a condutividade térmica depende da técnica de dispersão empregue, tendo sido superior para os nanofluidos de CNT funcionalizados. Os autores constataram ainda que a condutividade térmica de todas as amostras diminuiu com o tempo (Nasiri *et al.*, 2011).

Nos últimos anos, muitas investigações apresentaram resultados que evidenciam uma melhoria significativa da condutividade dos nanofluidos, face aos fluidos base. Um grande número de fenómenos físicos tem sido proposto para explicar os aumentos verificados, nomeadamente a concentração volúmica e o tamanho das nanopartículas, a sua elevada área específica superficial, o efeito da temperatura que intensifica o movimento Browniano, a existência de campos magnéticos, que provocam o alinhamento das nanopartículas, a formação de agregados e o valor de pH da mistura (Chandrasekar, Suresh e Chandra Bose, 2010; Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012; Chen e Xie, 2009; Chopkar, Das e Manna, 2006; Ding *et al.*, 2006;

Duangthongsuk e Wongwises, 2009; Habibzadeh *et al.*, 2010; Hwang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2008; Li, Xuan e Wang, 2005; Paul, Pal e Manna, 2010; Sharma *et al.*, 2011; Vajjha e Das, 2009; Wei *et al.*, 2010; Wen e Ding, 2004; Xie, Li e Yu, 2010; Yu *et al.*, 2010, 2010, 2011).

Geralmente, a condutividade térmica dos nanofluidos aumenta com o aumento da fração volúmica (Eastman *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2005; Xie *et al.*, 2002), com a diminuição das dimensões das nanopartículas (Xie *et al.*, 2002) e com o aumento da temperatura (Das *et al.*, 2003; Ding *et al.*, 2006). Os aditivos químicos, que alteram o valor de pH da mistura e promovem a sua estabilização, acabam por ter também alguma influência na condutividade térmica dos nanofluidos (Chiesa e Das, 2009; Kang, Kim e Oh, 2006; Wen e Ding, 2006; Yang e Han, 2006).

Em 2013, Lamas estudou a condutividade térmica de nanofluidos de MWCNT em diluições de etilenoglicol em água, e concluiu que a distribuição de tamanhos, geometria e fração volúmica das nanopartículas são os parâmetros que contribuem para o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos. No seu estudo, o autor registou um aumento máximo de 18,5% na condutividade térmica para um nanofluido com uma fração volúmica de 1,5%, contendo os MWCNT com a maior distribuição de comprimentos (Lamas, 2013).

2.4.4.2 MODELOS TEÓRICOS

O entendimento da condutividade térmica de misturas teve origem na *Effective Medium Theory* (EMT) de Maxwell, que as considera como sistemas heterogêneos constituídos por um meio líquido com partículas esféricas em suspensão sem interação térmica (Maxwell, 1873).

Os modelos clássicos para o comportamento desta propriedade termofísica de misturas partiram da EMT e têm em conta parâmetros como a forma das partículas, fração volúmica, condutividade dos materiais puros que compõem a mistura, e a resistência de *Kapitza*, isto é, a resistência térmica presente nas interações sólido-sólido das partículas (Bruggeman, 1935; Davis, 1986; Hamilton e Crosser, 1962; Hashin e Shtrikman, 1962; Hasselman e Johnson, 1987; Jeffrey, 1973).

Estes modelos possibilitam boas previsões para a condutividade térmica de misturas com partículas à escala micrométrica. Contudo, não permitem a previsão do comportamento de misturas com partículas nanométricas (Lamas, 2013).

Em 2002, Koblinski *et al.* propuseram o movimento Browniano das nanopartículas, a percolação através dos aglomerados e a existência de estruturas em nano-camadas como mecanismos responsáveis pelas melhorias da condutividade térmica dos nanofluidos, sendo por isso importante compreendê-los (Koblinski *et al.*, 2002).

O movimento Browniano consiste no movimento aleatório das nanopartículas no seio do fluido, que possibilita a ocorrência de colisões e, conseqüentemente, a transferência de calor direto entre as partículas em contacto (Koblinski *et al.*, 2002; Murshed *et al.*, 2011; Wang e Mujumdar, 2008).

A teoria da percolação prevê a existência de um valor limite de concentração de nanopartículas, para o qual ocorre a formação de uma cadeia contínua de partículas, que resultaria num aumento de grande magnitude na condutividade térmica do nanofluido. Este mecanismo seria mais evidente em partículas de geometria não esférica, como os CNT (Lamas *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2004; Sahoo *et al.*, 2010).

Quando em proximidade com a superfície das partículas sólidas, as moléculas de líquido tendem a estratificar-se, criando camadas intermediárias (sólido-líquido). Estas são denominadas por nano-camadas e atuam como uma ponte térmica entre as nanopartículas sólidas e o líquido de base, elevando a condutividade da camada (Trisaksri e Wongwises, 2007).

Os mecanismos apresentados estão associados ao grau de distribuição espacial e à contribuição da interação interparticular térmica (Lamas, 2013) e o estudo da influência destes mecanismos no aumento da condutividade térmica conduziu ao desenvolvimento de vários modelos teóricos, tendo em conta o efeito Browniano (Koo e Kleinstreuer, 2004; Pil Jang e Choi, 2007; Prasher, Bhattacharya e Phelan, 2005; Xuan, Li e Hu, 2003), a formação de agregados (Feng *et al.*, 2007; Prasher, Phelan e Bhattacharya, 2006; Wang, Zhou e Peng, 2003) e as estruturas em nano-camada (Xie, Fujii e Zhang, 2005; Xue e Xu, 2005; Yu e Choi, 2003).

Em 2003, Nan *et al.* propuseram um modelo preditivo para compósitos de CNT (Nan, Shi e Lin, 2003). Este, descrito como uma EMT mais generalista, relaciona o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos apenas com a condutividade térmica dos CNT, e sobrestima os resultados experimentais disponíveis na literatura (Lamas, 2013). Um ano depois, Nan *et al.* melhoraram o seu modelo introduzindo a limitação do aumento de condutividade térmica devido à resistência de *Kapitza*. No entanto, o modelo foi desenvolvido tendo em conta que as nanopartículas dispersas apresentam uma distribuição espacial classificada como uma estrutura diluída (Nan *et al.*, 2004).

Devido à inexistência de modelos preditivos robustos para dispersões com partículas não esféricas, que considerem as interações interparticulares, Lamas propôs um modelo preditivo denominado *Extended Differential Effective Medium Theory* (EDEM).

O EDEM tem por base o modelo de Nan *et al.* e surge de uma variação da *Differential Effective Medium Theory* (DEM) de Bruggeman. Este modelo contempla a condutividade térmica das nanopartículas e do meio, a geometria das nanopartículas, a fração de volume e a resistência de Kapitza como variáveis independentes e pode ser aplicado para dispersões homogêneas de MWCNT, a qualquer fração de volume. No entanto, o modelo EDEM não tem em consideração a aglomeração das nanopartículas (Lamas, 2013).

O trabalho desenvolvido por Lamas sugere ainda a inexistência de um comportamento anormal dos nanofluidos, ou a presença de quaisquer dos mecanismos teóricos sugeridos por (Kebinski *et al.*, 2002), ou seja, o movimento Browniano das nanopartículas, a existência de estruturas em nanocamadas e a percolação através dos aglomerados (Lamas, 2013).

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA

A fim de empregar os nanofluidos em aplicações concretas, um entendimento completo das suas características de transferência de calor é essencial. A transferência de calor por convecção desempenha um importante papel na maioria dos setores industriais. Espera-se que os nanofluidos com pequenas concentrações de nanopartículas contribuam para a melhoria da transferência de calor por convecção em sistemas reais, sem que isso implique perdas de pressão significativas, uma vez que as nanopartículas são ultrafinas.

A maioria das investigações experimentais desenvolvidas neste âmbito foca-se na transferência de calor por convecção forçada de nanofluidos, no interior de tubagens circulares (Freitas, 212AD). De forma a caracterizar o sistema real, é comum considerar como condição fronteira o fluxo de calor constante na parede da tubagem ou, em alternativa, a temperatura constante da parede.

É frequente a apresentação dos resultados experimentais segundo o número de Nusselt, para um determinado número de Reynolds tido como constante. O número de Nusselt depende das características do escoamento e das propriedades termofísicas do fluido que, por sua vez,

dependem da temperatura. Deste modo, a maioria dos dispositivos experimentais envolve a medição da temperatura do fluido, em diferentes regiões ao longo da tubagem (Freitas, 212AD).

A maioria dos trabalhos desenvolvidos no âmbito da transferência de calor por convecção diz respeito a nanofluidos com nanopartículas esféricas. Destes, a generalidade reportam que os nanofluidos apresentam um coeficiente de transferência de calor melhorado em comparação com o seu fluido de base, que aumenta significativamente com a concentração de nanopartículas e o número de Reynolds. No entanto, verificam-se divergências entre os resultados experimentais de diferentes grupos de pesquisa (Gupta *et al.*, 2014).

A Tabela 2.2 apresenta, sumariamente, a caracterização e os principais resultados de investigações experimentais com nanofluidos de CNT existentes na literatura.

Além das investigações presentes na Tabela 2.2, Ding *et al.*, em 2006, estudaram a transferência de calor por convecção de nanofluidos de CNT em base aquosa quando sujeitos a um escoamento interno num tubo horizontal. Os autores mostram que o tipo de escoamento e a concentração de CNT têm um impacto significativo no comportamento de transferência de calor. Contrariamente, a influência do pH da solução revelou-se pequena. Verificou-se ainda que a melhoria percentual do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos decresceu com o aumento da distância axial percorrida (Ding *et al.*, 2006).

No ano seguinte, Ding *et al.* compararam o desempenho de diferentes nanofluidos, tendo concluído que, dada uma concentração de nanopartículas e condições de escoamento, os nanofluidos de base aquosa e CNT apresentam o maior aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, seguidos pelos nanofluidos de titânio em base aquosa (Ding *et al.*, 2007).

Em 2010, Amrollahi *et al.* registaram um aumento de 33 – 40% do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos de MWCNT em base aquosa, com uma concentração volúmica de 0,25% a 20°C, tanto em regime laminar como turbulento (Amrollahi *et al.*, 2010).

Wang *et al.* também estudaram o desempenho da transferência de calor de nanofluidos de CNT num tubo circular horizontal. O aumento da transferência de calor foi de 70% a 190% para um número de Reynolds de 120, e concentrações volúmicas de 0,05% e 0,24%, respetivamente. Por outro lado, o aumento da condutividade térmica foi inferior a 10%, o que levou os autores a

concluírem que o aumento da condutividade térmica não poderia ser o único mecanismo responsável pelo desempenho dos nanofluidos (Wang *et al.*, 2013).

Tabela 2.2 – Principais investigações no âmbito da caracterização da transferência de calor por convecção de nanofluidos com CNT (CTAC - cloreto de cetil trimetil amónio; A – água; O- óleo de transferência de calor) .

Autores	Nanofluido	Condições experimentais	Observações
(Ding et al., 2006)	MWCNT/A 0,1-0,5%	L=0,97m; D=4,5mm Fluxo de calor constante Regime laminar (800-1200)	350% para o h a 0,5% de MWCNT e Re=800
(Garg et al., 2009)	MWCNT/A 1% D=10-20nm L=0,5-40µm	L=0,914m; D=1,55mm Fluxo de calor constante Regime laminar (600-1200)	32% para o h com Re=600±100 Aumento da transferência de calor com o aumento da distância axial
(Amrollahi et al., 2010)	MWCNT/A 0,1-0,25% D=150-200nm	L=1m; D=11,4mm Fluxo de calor constante Regime laminar e turbulento (1500-5000)	12% para o h a 0,12% MWCNT 40% para o h a 0,25% MWCNT Parâmetros influentes no h na região de entrada incluem fração de MWCNT, número de Reynolds e temperatura
(Liu e Liao, 2010)	CNT/CTAC 0,5-4,0% D=10-20nm L=1-2µm	Regime turbulento (10^4 a 5×10^4)	As características de transferência de calor dos nanofluidos dependem fortemente da temperatura, da concentração de CNT e de CTAC. Segundo os autores, estes nanofluidos poderiam ser usados para resolver o problema da deterioração da transferência de calor dos fluidos lubrificantes convencionais.
(Abreu, 2010)	MWCNT/A 0,25%	L=1,2m; D=6mm Regime laminar Fluxo de calor constante	Aumento de 105% para do coeficiente de transferência de calor por convecção para Re=2060.
(Ashtiani, Akhavan- Behabadi e Pakdaman, 2012)	MWCNT/O 0,1-0,4% (concentração mássica)	Regime laminar hidrodinamicamente desenvolvido (inferior a 1500) Temperatura da parede constante Tubagens circulares e achatadas	Quanto maior a concentração de nanopartículas, maior a taxa de aumento da transferência de calor face ao fluido base. O desempenho dos nanofluidos é superior utilizando tubagens circulares em vez de tubagens achatadas (secção aproximada a uma elipse).
(Wang et al., 2013)	MWCNT/A 0-0,24% D=20-30nm L=5-30µm	Regime laminar (20-250) Fluxo de calor constante	O fator de atrito dos nanofluidos apresenta boa concordância com as previsões da teoria de Hagen-Poiseuille. Os resultados sugerem que os nanofluidos com pequenas concentrações de MWCNT melhoram a transferência de calor, sem aumentar significativamente as necessidades de bombagem.
(Fakoor- Pakdaman, Akhavan-	MWCNT/O 0,1-0,4%	Regime laminar na região de entrada (0-2000) Temperatura da parede constante	Os autores propuseram correlações para prever as propriedades termofísicas dos fluidos devido à sua elevada dependência

Behabadi e
Razi, 2013)

da temperatura. Os autores constataram que a utilização de tubos com espirais helicoidais, ao invés de tubos retos, provoca um aumento exponencial das perdas de carga.

Em 2013, Fernandes avaliou o desempenho de nanofluidos de MWCNT em etilenoglicol e água em escoamentos laminares sujeitos a um fluxo de calor constante na parede da tubagem. O autor verificou um aumento máximo do coeficiente de transferência de calor por convecção de 6,3 % e 13,8% para os nanofluidos com concentrações de nanopartículas de 0,25%vol e 0,50%vol, respetivamente, para a região completamente desenvolvida da camada limite hidrodinâmica em comparação com o fluido base. O seu estudo permitiu ainda constatar que o aumento da transferência de calor não se deve exclusivamente ao aumento da condutividade térmica. As principais razões apontadas para justificar este aumento é o facto de os MWCNT apresentarem uma baixa concentração de percolação, que permite mais facilmente formar redes de percolação ao longo do fluido, contribuindo para o aumento da transferência de calor. Outro motivo proposto para justificar este aumento foi o movimento Browniano (Fernandes, [s.d.]).

2.5.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Na maior parte dos trabalhos presentes na literatura, os resultados da transferência de calor dos nanofluidos são comparados com os dos seus fluidos base, para um determinado número de Reynolds constante (Gupta *et al.*, 2014). Contudo, esta metodologia de análise pode conduzir a resultados enganosos, pois o número de Reynolds representa o contributo de várias propriedades termofísicas (Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012).

Este facto tornou-se evidente nos resultados de Pak e Cho que constataram que, para uma velocidade de escoamento constante, o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido, revelou ser 12% inferior ao da água pura (Pak e Cho, 1998). Yu *et al.* também apresentaram resultados semelhantes, na ordem dos 7%, para o nanofluido de SiC em água, a uma velocidade constante (Yu *et al.*, 2009). O mesmo comportamento foi ainda registado para nanofluidos de óxido de alumínio e água, óxido de titânio e água, e óxido de zircónio e água (Rea *et al.*, 2009; Williams, Buongiorno e Hu, 2008).

Nos trabalhos experimentais desenvolvidos é comum utilizar correlações teóricas convencionais existentes para fluidos monofásicos para caracterizar o desempenho dos nanofluidos.

Os resultados da transferência de calor por convecção em regime laminar são frequentemente validados utilizando o modelo teórico de Shah. Para escoamentos turbulentos, utilizam-se normalmente as equações de Gnielinski ou Dittus-Boelter. Contudo, alguns autores consideram que as correlações clássicas subestimam os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos (Syam Sundar e Singh, 2013).

Consequentemente, têm sido propostas novas correlações para o cálculo do número de Nusselt (Anoop, Sundararajan e Das, 2009; Asirvatham *et al.*, 2011; Buongiorno, 2006; Duangthongsuk e Wongwises, 2010; Maïga *et al.*, 2005; Pak e Cho, 1998; Rea *et al.*, 2009; Sajadi e Kazemi, 2011; Suresh, Chandrasekar e Chandra Sekhar, 2011; Suresh *et al.*, 2012; Syam Sundar *et al.*, 2012; Vajjha, Das e Kulkarni, 2010; Xuan e Li, 2003; Yang *et al.*, 2005), e também para a determinação do coeficiente de atrito (Suresh, Chandrasekar e Chandra Sekhar, 2011; Suresh *et al.*, 2012; Syam Sundar *et al.*, 2012; Vajjha, Das e Kulkarni, 2010), a maioria destinada à caracterização de nanofluidos com partículas esféricas.

Porém, nenhuma destas correlações foi validada para um vasto espectro de resultados experimentais, ou condições de teste, por isso, são pouco aceitas junto da comunidade científica (Syam Sundar e Singh, 2013). Apesar das divergências, Duangthongsuk e Wongwises concluíram que a fiabilidade e exatidão do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos podem depender mais do sistema de calibração do aparelho experimental (Duangthongsuk e Wongwises, 2008). Por outro lado, outros estudos experimentais mostraram que as correlações existentes para o cálculo do coeficiente de atrito de fluidos monofásicos providenciam estimativas adequadas para os nanofluidos (Syam Sundar e Singh, 2013).

2.5.2 MECANISMOS ENVOLVIDOS NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Atualmente existe ainda controvérsia em relação à análise do desempenho dos nanofluidos na transferência de calor por convecção forçada. Apesar de muitas investigações apresentarem resultados que revelam uma melhoria significativa do coeficiente de transferência de calor por convecção de vários nanofluidos face aos seus fluidos base (Gupta *et al.*, 2014), tem-se verificado

que nem todos os nanofluidos que apresentam melhorias na condutividade térmica produzem melhorias na transferência de calor forçada.

Ainda assim, muitas investigações referem que o aumento da concentração volúmica, a diminuição do tamanho das nanopartículas, e o recurso a partículas com geometria não esférica e de elevada razão de aspeto, promovem o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção (Gupta *et al.*, 2014).

Enquanto existir dispersão relativamente às condições experimentais para cada grupo de investigação, não será possível encontrar consenso relativamente ao mecanismo responsável pela melhoria da transferência de calor. Contudo, com base nos estudos experimentais e numéricos já realizados, podem fazer-se algumas observações.

Existem mecanismos subjacentes à melhoria do coeficiente de transferência de calor por convecção, além do aumento da condutividade térmica, que podem estar relacionados com o comportamento das nanopartículas na camada limite térmica. Sob condições de convecção forçada, quer em regime laminar ou turbulento, a tensão de corte e o gradiente de temperatura na camada limite podem conduzir à redistribuição das nanopartículas. Estes fenómenos resultam na distribuição não uniforme da condutividade térmica e da viscosidade, levando à alteração da resistência térmica da camada limite (Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012; Gupta *et al.*, 2014).

Segundo Gupta *et al.*, a migração das nanopartículas devido ao movimento Browniano ou termoforese resulta num perfil de velocidades achatado (Gupta *et al.*, 2014). Por outro lado, também o modo de dispersão, a aplicação de ultrassons e de aditivos afetam as características dos nanofluidos, sendo necessário compreender a sua influência no desempenho do nanofluido na transferência de calor (Gupta *et al.*, 2014).

Em 2009, Wen *et al.* estudaram o contributo das propriedades dos nanofluidos na transferência de calor, e chegou à conclusão que o coeficiente de transferência de calor por convecção por ser expressado genericamente como uma função:

$$h = \frac{k^a \rho^b c_p^c}{\mu^d \sigma^e} \quad 2.4$$

onde a, b, c, d, e e são constantes empíricas ou teóricas que dependem de diferentes condições geométricas e de contorno. A constante e é normalmente zero, para convecção sem mudança de fase (Wen *et al.*, 2009). Segundo a equação 2.4, o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) deve aumentar com o aumento da condutividade térmica (k), da densidade (ρ), do calor específico (c_p), e também com a diminuição da viscosidade (μ) e da tensão superficial (σ). A adição de nanopartículas num líquido base pode afetar todas estas propriedades, afetando assim o coeficiente de transferência de calor.

A literatura existente indica que a condutividade térmica, a densidade e a viscosidade dos nanofluidos aumentam face aos seus fluidos base, enquanto que o calor específico e a tensão superficial podem aumentar ou diminuir. Desta forma, a condutividade térmica e a densidade irão contribuir positivamente para a transferência de calor. No entanto, as restantes propriedades podem ter um efeito negativo, pelo que a escolha das nanopartículas e do fluido base deve ser então conseguida de forma a otimizar as propriedades termofísicas dos nanofluidos, para que estes sejam uma alternativa viável aos fluidos de permuta convencionais (Gupta *et al.*, 2014). Assim, a necessidade da otimização das propriedades termofísicas dos nanofluidos, surge como um novo caminho para investigações futuras.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DOS NANOFLUIDOS

3.1 PLANO DE EXPERIÊNCIAS - DOE

Tal como referido no capítulo 1, a presente dissertação visa caracterizar o coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos de MWCNT em escoamentos laminares. Para o efeito, foi desenvolvido um plano de experiências (*Design of Experiment* - DOE), a fim de analisar as variáveis e parâmetros envolvidos na transferência de calor utilizando nanofluidos.

De acordo com a literatura disponível, a transferência de calor depende de diversos fatores, em particular das propriedades termofísicas do fluido e das suas condições de escoamento. No entanto, os mecanismos subjacentes a este fenómeno não se encontram ainda esclarecidos, pelo que é importante procurar compreendê-los.

Foram identificados cinco fatores de controlo principais que podem influenciar a transferência de calor por convecção, nomeadamente, a geometria dos MWCNT, a sua fração volúmica, o tipo de fluido base, a temperatura de ensaio e as características do escoamento, que se traduzem no número de Reynolds. Assim, os parâmetros enumerados foram considerados como variáveis independentes neste estudo.

Atendendo às variáveis consideradas, foram produzidos, para o desenvolvimento da presente dissertação, nanofluidos de MWCNT dispersos em diluições de 30% de etilenoglicol em água. As nanopartículas utilizadas foram fabricadas segundo o processo CCVD pela empresa *Cheaptubes Inc.* (Lamas, 2013). As principais características dos MWCNT utilizados neste trabalho experimental

encontram-se descritas na Tabela 3.1. Estes, apresentam diâmetros compreendidos num intervalo de 20 a 40nm e comprimentos entre 10 e 30 μ m, com uma razão de aspeto de 250 a 1500.

Tabela 3.1 - Designação dos vários tipos de nanopartículas e suas principais características (adaptado de (Lamas, 2013)).

Designação	Fabricante	Resíduos [wt.%]	Pureza [wt.%]	ρ_{MWCNT} [kg/m ³]	l_p/d_p
d20-40 l10-30	Cheaptubes Inc.	<1.5	>95	2160	250-1500

O fluido base produz alterações nas propriedades termofísicas do meio, o que pode produzir uma variação estatística significativa dos resultados. Contudo, selecionou-se apenas um fluido base, uma diluição aquosa com 30% de etilenoglicol, uma vez que a utilização diversos fluidos base implicaria novos ciclos de produção de nanofluidos, funcionalização de nanopartículas e ensaios em bancada, inviáveis de realizar no âmbito da concretização deste trabalho de dissertação. A escolha deste fluido prende-se com o facto das soluções aquosas de etilenoglicol serem comuns em aplicações de transferência de calor devido ao seu fator anticongelante, como foi já referido. Outra razão para a utilização deste tipo de fluido base, prende-se pelo facto de este também ter sido utilizado na produção de nanofluidos de MWCNT em trabalhos anteriores levados a cabo pelo grupo de investigação, tendo sido já caracterizadas algumas das suas propriedades. Por outro lado, a utilização de uma diluição aquosa com 60% de etilenoglicol também seria possível nestes termos, contudo, as exigências de bombagem superiores devido ao aumento da viscosidade do fluido base com maior percentagem de etilenoglicol levaram à sua exclusão.

Atendendo à dependência do coeficiente de transferência de calor por convecção com a temperatura, como se verificou na secção 2.5.2, consideraram-se duas temperaturas de ensaio, 293,15K e 313,15K. Estas temperaturas são monitorizadas na entrada da secção de teste. No final de cada ensaio foram corrigidas todas as propriedades para a temperatura média do fluido na secção, assunto que será tratado com mais detalhe no capítulo 4. A temperatura máxima de 313,15K foi definida de modo a garantir a segurança e conservação do dispositivo experimental, tendo em conta os seus limites de utilização.

Além da geometria dos MWCNT, a fração volúmica das nanopartículas também foi identificada como um importante fator de controlo. Deste modo, foram produzidos nanofluidos com frações volúmicas de 0,25% e 0,5% de MWCNT, para assim se compreender a sua influência na transferência de calor por convecção do nanofluido. Prevê-se que esta variável seja de grande

importância para as propriedades termofísicas dos nanofluidos, e na transferência de calor por convecção, como é sugerido pela comunidade científica e se evidenciou ao longo do capítulo 2. Uma vez que a viscosidade é um parâmetro influente nos processos de transferência de calor reais, consideraram-se valores de concentração máximos de 0,5%. Espera-se que duas concentrações possibilitem a discussão de resultados acerca da influência deste fator de controlo na transferência de calor por convecção.

Procurou-se ainda avaliar a influência das condições de escoamento no desempenho destes nanofluidos na transferência de calor por convecção. Uma vez que o dispositivo existente apenas possibilita a realização de ensaios em regime laminar, considerou-se a realização destes com escoamentos com três números de Reynolds distintos, ou seja, 1000, 1500 e 2000.

A Tabela 3.2 sumariza os fatores de controlo selecionados para o estudo e os seus respetivos graus de liberdade.

Tabela 3.2 – Fatores de controlo utilizados no estudo.

Fatores de controlo	MWCNT A	Fluido Base B	ϕ [%] C	Temperatura[K] D	Reynolds E
Nível 1	d20-40, l10-30	70%AD+30%EG	0,25	293,15	1000
Nível 2	-	-	0,50	313,15	1500
Nível 3	-	-	-	-	2000

Utilizando uma abordagem *full factorial DOE*, a qual pressupõe que todos os graus de liberdade de cada fator são combinados com os dos restantes, o número de combinações a analisar resulta em $ABCDE = 1 \times 1 \times 2 \times 2 \times 3$, ou seja, um total de 12 ensaios experimentais. Contudo, na análise de resultados espera-se poder comparar o desempenho dos nanofluidos em estudo com o respetivo fluido base, pelo que é necessário que também este seja testado sob as mesmas condições que os restantes fluidos.

Os três princípios básicos de um DOE são a aleatoriedade, o bloqueio e a replicação. Através da distribuição aleatória dos ensaios experimentais, é possível calcular a média dos efeitos de fatores externos, que podem estar presentes. Por outro lado, o bloqueio permite aumentar a precisão quando não é possível, ou é inconveniente, utilizar o fator de aleatoriedade. O bloqueio foi estabelecido ao impor as condições de ensaio, isto é, o número de Reynolds do escoamento, a temperatura de entrada deste na secção de testes e o fluxo de calor constante na parede de 125W.

A replicação das medições experimentais possibilita a identificação de variações ou incertezas experimentais. Se o número de replicação ou amostragem for demasiado baixo, a experiência resultará em dados com pouca precisão enquanto que, se for demasiado elevado, serão consumidos tempo e recursos em troca de um ganho mínimo. Deste modo, procurou-se estabelecer um tamanho de amostra adequado. Neste sentido, considerou-se a recolha de dados em intervalos de 2 segundos para os valores de temperatura obtidos pelos termopares, e intervalos de 5 segundos para os valores de potência da banda resistiva, por um período de uma hora, em cada ensaio realizado. No entanto, após terem sido realizados os ensaios de calibração e validação do dispositivo experimental com água destilada e fluido base, o tempo de ensaio foi otimizado para 30 minutos. Além destas considerações relativas à recolha de dados e duração dos ensaios, realizaram-se pelo menos dois ensaios para cada conjunto de condições experimentais. Para os fluidos de calibração, água destilada e fluido base, realizaram-se cinco ensaios para o número de Reynolds de 1500, a cada temperatura, de forma a que, uma vez mais, a repetibilidade dos ensaios seja assegurada. No caso do nanofluido com 0,25% de MWCNT, foram realizados cinco ensaios experimentais para cada conjunto de condições. No entanto, devido ao grande número de ensaios, o consumo de tempo relevou-se elevado e, uma vez que se considerou que o dispositivo experimental apresenta uma repetibilidade aceitável dos ensaios levados a cabo, foram realizados apenas dois ensaios para conjunto de condições com o nanofluido com 0,5% de MWCNT.

Assim, definidos os objetivos específicos, foi necessário produzir os nanofluidos a caracterizar. De forma a assegurar a estabilidade da dispersão a acontecer, foi necessário sujeitar os MWCNT a um tratamento de modificação das suas superfícies. O procedimento químico adotado foi a funcionalização covalente que deve ser executado em nanopartículas pristinas, antes da sua dispersão. A metodologia utilizada apresenta-se de seguida.

3.2 FUNCIONALIZAÇÃO DE MWCNT

Uma vez que o fluido base selecionado é um solvente polar, é necessário transformar as superfícies hidrofóbicas das partículas de MWCNT em hidrofílicas, invertendo a sua polaridade, de modo a evitar a formação de agregados (Yu e Xie, 2012). O modo de funcionalização adotado foi a funcionalização covalente. Os processos mais comuns de funcionalização covalente são os

tratamentos oxidativos, que possibilitam a adição de grupos oxigenados funcionais aos MWCNT, nomeadamente os grupos carboxílicos e álcoois.

A funcionalização dos MWCNT prístinos foi realizada pelo grupo de investigação GRIDS utilizando a metodologia proposta por (Esumi *et al.*, 1996; Lamas, 2013), tendo consistido nos seguintes procedimentos:

- 1) Num vidro de relógio, foi medida a massa de 20g de MWCNT prístinos, utilizando uma balança de elevada precisão ($\Delta m=0,001g$);
- 2) De seguida, as nanopartículas foram transferidas para uma proveta de 5l, na qual foram adicionados 200ml de ácido nítrico (HNO_3) e 600ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), o que representa uma proporção 1:3 em volume, ou seja de 40ml de ácidos por grama de MWCNT, como é sugerido por alguns investigadores (Chen *et al.*, 2004; Esumi *et al.*, 1996; Kanagaraj, Ponmozhi e Varanda, 2008; Ponmozhi *et al.*, 2010; Veingnon *et al.*, 2011; Xie e Chen, 2011; Xie *et al.*, 2003; Zhou, Xu e Shi, 2008);
- 3) A mistura foi aquecida até ao ponto de ebulição, a 413K, e mantida a esta temperatura durante 30min, utilizando uma placa de aquecimento com agitação magnética;
- 4) No final da reação química a mistura foi diluída em água destilada e deixada em repouso por um período de 24h;
- 5) Findo o período de repouso, as partículas foram lavadas intensamente com água destilada, até não possuírem sinais de acidez. Quando necessário, recorreu-se a ciclos de centrifugação para melhorar os resultados. Nesta fase, os grupos carboxílicos encontram-se já ligados à superfície dos MWCNT sendo, por esse motivo, impossível alcançar o pH da água destilada (± 7) (Shim, Park e Ryu, 2001; Xie *et al.*, 2003);
- 6) Os MWCNT foram recolhidos e secos num forno a 373,15K, tornando-se partículas duras;
- 7) Finalmente, as partículas secas foram transformadas de novo em pós com recurso a um moinho analítico (*analytical miller*);
- 8) Os MWCNT funcionalizados foram posteriormente armazenados num dessecador, assegurando que estes não absorviam humidade, para que a sua densidade efetiva não fosse alterada.

Na Figura 3.1 são apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de MWCNT primitivos, e das partículas após sofrerem o processo de funcionalização.

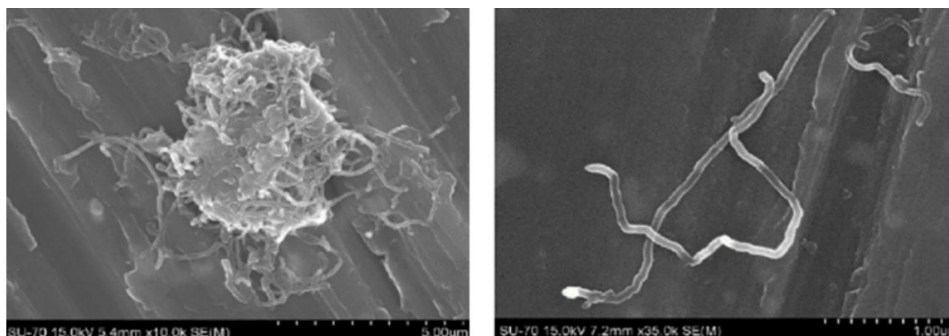


Figura 3.1 - Imagem SEM de MWCNT prístinos (esq.) e funcionalizados (dir.) (adaptado de Lamas, 2013).

Facilmente se observa que os fortes aglomerados presentes na amostra de MWCNT prístinos, já não são visíveis após a sua funcionalização.

3.3 QUALIDADE DE FUNCIONALIZAÇÃO DOS MWCNT

Após a funcionalização dos MWCT foi necessário sujeitá-los a uma avaliação rigorosa que possibilite a verificação da qualidade da funcionalização covalente. Esta avaliação compreende a verificação da presença dos grupos carboxílicos produzidos aquando da funcionalização, a verificação do comportamento térmico das partículas funcionalizadas e a estabilidade dos MWCNT funcionais a alta temperatura, e ainda a avaliação da distribuição dos tamanhos dos MWCNT funcionalizados, de modo a verificar se houve encurtamento ou quebra das partículas.

Uma vez mais, estes procedimentos não foram realizados no âmbito desta dissertação, mas foram levados a cabo pelo grupo de investigação no qual este trabalho se insere, e publicados (Lamas, 2013; Lamas *et al.*, 2012), apresentando-se nesta dissertação devido à sua importância na produção de nanofluidos funcionais. Estes procedimentos, embora não tendo sido realizados, foram estudados de forma a compreender todo o procedimento de preparação dos nanofluidos.

3.3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS GRUPOS PRODUZIDOS

Com o objetivo de avaliar a qualidade da funcionalização das nanopartículas, utilizou-se a técnica de espectroscopia infravermelha da transformada de Fourier (FTIR) em MWCNT primitivos e funcionalizados, para identificar os grupos funcionais presentes na superfície das nanopartículas após a sua funcionalização. Este método de análise consiste na utilização de luz infravermelha sobre a amostra e o registo do espectro de absorção de radiação, permitindo a identificação dos componentes químicos presentes. As medições FTIR foram efetuadas com o auxílio de um espectrómetro num intervalo de 400 a 4000 cm^{-1} . Na

Figura 3.2 podem visualizar-se os espectros resultantes das medições realizadas a MWCNT puros e funcionalizados. Todas as amostras medidas apresentaram um pico próximo do valor de 1630 cm^{-1} , que representa as ligações de carbono (C=C) (Rahimpour *et al.*, 2012). Esta evidência sugere que a integridade das partículas não foi alterada após a sua funcionalização e os elevados valores de absorvância nos intervalos 1150 a 1210 cm^{-1} , 1150 cm^{-1} e 1710 cm^{-1} evidenciam a presença de ligações carbono-oxigénio, oxigénio-hidrogénio e um alongamento da ligação carbono-oxigénio, respetivamente (Kim, Han e Hong, 2008; Peng *et al.*, 2003; Rahimpour *et al.*, 2012; Shaffer, Fan e Windle, 1998; Xie *et al.*, 2003; Zhang, Gu e Fujii, 2007). A presença destes componentes químicos confirma a existência dos grupos carboxílicos resultantes da funcionalização covalente, comprovando a qualidade da metodologia adotada.

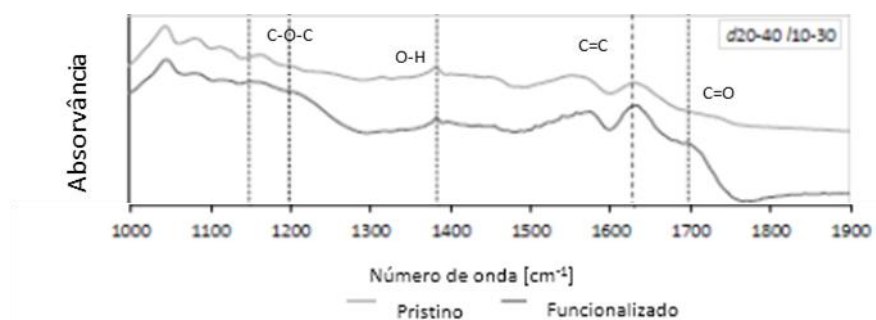


Figura 3.2 - Espectro de FTIR obtido para MWCNT prístinos e funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013).

3.3.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

A avaliação do comportamento térmico dos MWCNT funcionais fez-se através da análise termo gravimétrica (TGA). A TGA mede a perda de massa de uma amostra em função da temperatura,

indicando a sua taxa de decomposição. As medições foram realizadas em partículas MWCNT primitivas e funcionalizadas, com o objetivo de comparar as suas taxas de perda de massa, utilizando para o efeito o equipamento Setaran DSC-TG. No decorrer deste procedimento considerou-se uma taxa média de aquecimento de, aproximadamente, 10K/min, de modo a prevenir que a taxa de temperatura imposta influencie a temperatura de degradação efetiva da amostra (Hsieh *et al.*, 2010; Talaei *et al.*, 2011).

Os resultados provenientes da análise TGA são fortemente influenciados pela atmosfera, devido à possibilidade do oxigénio reagir com os grupos funcionais, o que iria oxidar os MWCNT, decompondo-os rapidamente. Desta forma, recorre-se a uma atmosfera inerte, de azoto, para garantir que os fenómenos de degradação que possam ocorrer nos MWCNT se devem apenas ao efeito da temperatura.

Na Figura 3.3 é possível verificar que as partículas funcionalizadas se degradam com o aumento da temperatura, embora a perda de massa sofrida não tenha ultrapassado os 10%.

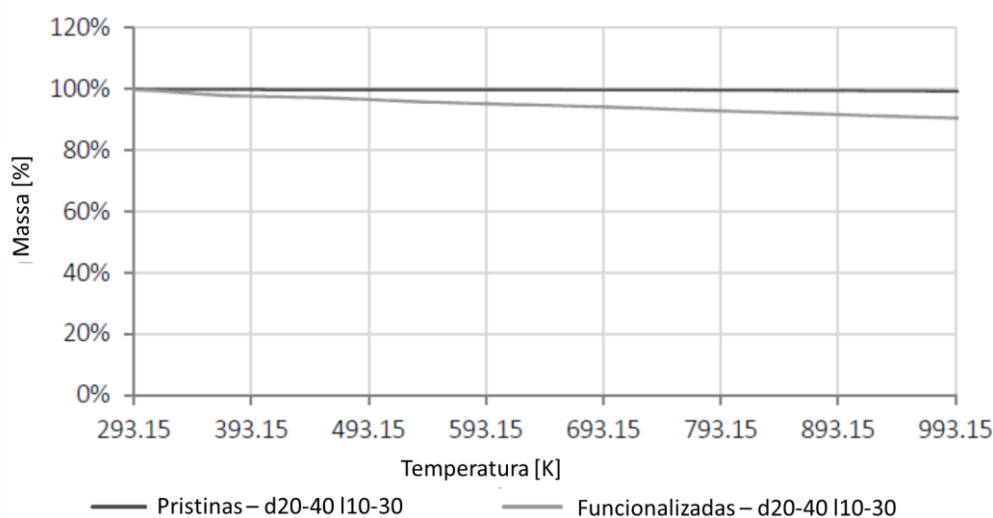


Figura 3.3 - Gráfico da análise TGA e consequente comparação entre MWCNT prístinos e funcionalizados (d50-80 I10-20) (adaptado de Lamas, 2013).

Este valor pode indicar a presença de algumas impurezas ou fragmentos que não foram eliminados após a funcionalização das partículas, e que podem facilmente degradar-se com o aumento da temperatura, sendo posteriormente evaporados. Por outro lado, os MWCNT prístinos não apresentaram qualquer perda de massa com o aumento de temperatura. Face aos resultados apresentados na Figura 3.3, pode considerar-se que os MWCNT funcionalizados possuem

estabilidade térmica para as condições de análise da situação em estudo, já que a sua perda de massa é desprezável.

3.3.3 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DAS NANOPARTÍCULAS

Apesar do método de funcionalização adotado possibilitar a produção de dispersões sem aglomerados de MWCNT, deve reconhecer-se que esta técnica provoca degradação na geometria das nanopartículas, nomeadamente redução de comprimento dos nanotubos. Da mesma forma, a utilização de ultrassons na dispersão dos MWCNT no fluido base, também contribui para esta alteração da geometria das nanopartículas (Hilding *et al.*, 2003), pelo que a distribuição das dimensões dos nanotubos de carbono diferem dos enunciados pelo fabricante. Deste modo foi necessário avaliar as dimensões efetivas das nanopartículas tratadas.

A técnica utilizada pelo grupo de investigação foi a análise de imagens obtidas por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) (Lamas, 2013). Contudo, há a necessidade de preparar previamente os MWCNT, pois estes devem encontrar-se completamente secos. Assim, as nanopartículas são primeiro dispersas em etanol a baixas concentrações, e depois colocadas a secar sobre a superfície de suporte para amostras do aparelho Hitachi SU.70, que opera num ambiente em vácuo. Depois de secas, os MWCNT são pulverizados com carbono com o objetivo de assegurar a condutividade dos eletrões. Finalmente, são produzidas as imagens recorrendo à tecnologia SEM.

A análise das imagens obtidas por SEM, com vista à medição da distribuição das medições efetivas os MWCNT, foi realizada manualmente utilizando o software *Drafsight* da *Dassault Systèmes*. Devido à impossibilidade de recolher imagens de partículas isoladas sob a forma estendida, necessárias para uma análise automática, esta metodologia acarreta um conjunto de erros associados ao processamento manual das imagens, acrescidos pelo facto de as medições serem realizadas em imagens projetadas, sobretudo no que diz respeito à estimativa do comprimento dos nanotubos, devido à sua natureza tridimensional. No entanto, foi possível assegurar a diminuição do grau de incerteza das medições utilizando um grande número de imagens na análise de cada geometria de MWCNT (Lamas, 2013). A Figura 3.4 apresenta a imagem SEM de uma dispersão de MWCNT e a respetiva representação esquemática utilizada na caracterização das dimensões dos nanotubos.

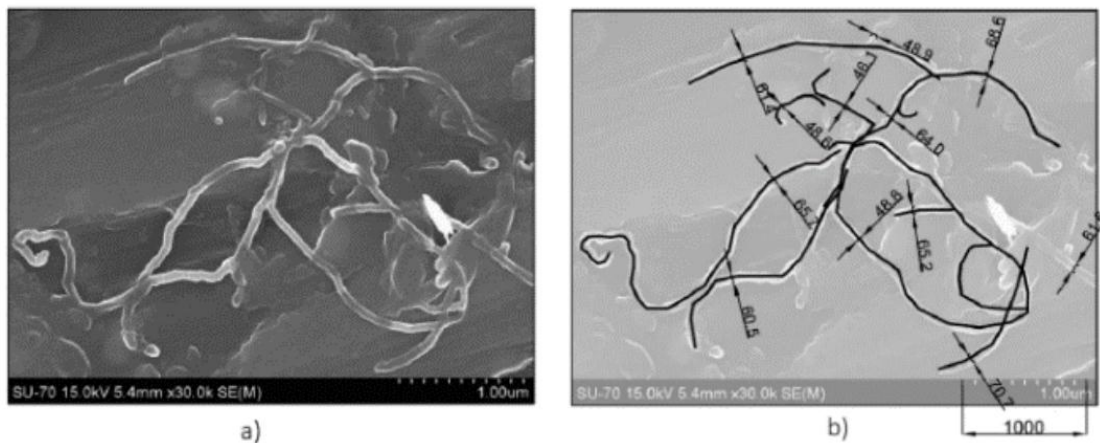


Figura 3.4 - Imagem SEM de uma dispersão de MWCNT (a) e representação esquemática do procedimento de medida usado (b) (adaptado de (Lamas, 2013)).

3.4 DISPERSÃO DE MWCNT

Após a funcionalização dos MWCNT foi finalmente possível dispersá-los no fluido base e conseguir uma mistura duradoura. Para a realização deste estudo foi necessário produzir 1l de cada um dos nanofluidos. Porém, a produção desta quantidade de nanofluido de uma só vez não é possível, pois a estabilidade da mistura seria comprometida. Assim, foi necessário produzir os nanofluidos em quantidades de 50ml, cuja metodologia foi já otimizada pelo grupo de investigação. Atendendo a este constrangimento, foi calculada a concentração volúmica de nanopartículas a utilizar na produção de cada nanofluido, utilizando a equação 3.1.

$$\varphi = \frac{\frac{m_{CNT}}{\rho_{CNT}}}{\frac{m_{CNT}}{\rho_{CNT}} + V_{fb}} 100 \quad 3.1$$

Segundo a equação 3.1, a concentração volúmica de MWCNT (φ), em percentagem, pode ser determinada conhecendo a massa (m_{CNT}) e densidade (ρ_{CNT}) das partículas, e o volume do fluido base (V_{fb}). Dada a ordem de grandeza do volume das nanopartículas face ao volume total, considerou-se a sua aproximação ao volume do fluido base, isto é,

$$V_{nf} = V_{fb} + V_{CNT} \cong V_{fb} \quad 3.2$$

Na Tabela 3.3 estão apresentadas as quantidades de nanopartículas necessárias para produzir as amostras.

Tabela 3.3 – Volume de água destilada (AD) e etilenoglicol (EG), e massa de nanopartículas (MWCNT) necessários para a produção de 50ml de nanofluido.

Fluido base	φ	V_{AD} [ml]	V_{EG} [ml]	m_{MWCNT} [g]
AD + 30%EG	0,25%	35	15	0,271
	0,50%	35	15	0,543

A dispersão de MWCNT foi realizada utilizando os seguintes passos, segundo uma solução aquosa (adaptado de Lamas, 2013):

- 1) Com uma balança de precisão ($\Delta m=0,001g$) foi medida a massa total de partículas necessárias ao nanofluido (Tabela 3.3);
- 2) Com uma proveta graduada ($\Delta V=0,5ml$), foi medido o volume de fluido base (Tabela 3.3);
- 3) A solução foi uniformizada por um agitador magnético por um período de 5min;
- 4) De seguida, foi aplicada na mistura uma energia ultrassónica de 12,5kJ utilizando para o efeito o Bioblock Scientific Vibra-Cell 75043 “sonicator” com $20kHz \pm 50Hz$, a uma amplitude de 20% e com uma baixa intensidade da sonda de cavitação, permitindo a libertação de energia numa grande área, de modo a diminuir a possibilidade de degradação dos MWCNT;
- 5) A mistura foi deixada em repouso, a arrefecer naturalmente, por um período de 5 minutos;
- 6) Os passos 4 e 5 foram repetidos mais 3 vezes, até a energia de ultrassons perfazer 50kJ;
- 7) No final foi realizado um teste visual a olho nu, para averiguar se a mistura apresentava aglomerados de nanopartículas.

Quando possível, os nanofluidos foram produzidos com um volume de 100ml. O procedimento utilizado foi o apresentado para as duas quantidades, com exceção da energia de ultrassons, que foi de 25kJ em cada ciclo para um volume de 100ml de fluido, e do tempo de arrefecimento entre ciclos de ultrassons, com um tempo de arrefecimento de 10 minutos.

3.5 ESTABILIDADE COLOIDAL

Apesar da presença dos grupos funcionais, identificados utilizando a análise FTIR conforme descrito na secção 3.3.1, a probabilidade de aglomeração pode não ser desprezável, como se desejaria. Como tal, recorre-se a uma avaliação das forças de repulsão entre os MWCNT funcionalizados no seio da mistura, utilizando o método do potencial zeta. Por outro lado, é importante determinar a taxa de sedimentação dos nanofluidos produzidos, a fim de estimar o seu tempo de vida, o que pode ser conseguido utilizando o método *LUMiSizer*.

3.5.1 ANÁLISE DAS FORÇAS DE *VAN DER WAALS*

De acordo com a teoria DVLO, se as forças de *van der Waals* repulsivas nas interações interparticulares forem superiores às positivas, a probabilidade de se formarem aglomerados é baixa. O potencial zeta é um indicador de estabilidade da mistura coloidal, que representa a diferença de potencial entre o meio de dispersão e a camada estacionária de fluido adjacente às partículas dispersas. Desta forma, quando um nanofluido possui um potencial zeta elevado, superior a 25mV, as nanopartículas possuem um grau de repulsão elevado e pode considerar-se que a solução é estável. Por oposição, se o valor do potencial zeta for inferior a 25mV, as misturas tendem a formar sedimentos. Para valores de potencial zeta entre 40mV e 60mV as misturas apresentam um bom nível de estabilidade; para valores superiores a 60mV, a estabilidade da mistura é excelente (Yu e Xie, 2012).

O potencial zeta não é mensurável, mas pode ser estimado através de modelos teóricos, geralmente fornecidos pelo *software* do instrumento experimental. Nos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de investigação, as medições do potencial zeta foram conduzidos num *Malvern* analisador Nano ZS S a 293,15 K. Neste, é aplicado um campo elétrico à dispersão, o que permite que as partículas se desloquem com uma dada velocidade, na direção do eletrodo. Esta velocidade é medida através de dispersão da luz, permitindo assim calcular a mobilidade eletroforética e, a partir desta, o potencial zeta da amostra pode ser estimado através da equação de Smoluchowski (Lamas, 2013).

Uma vez que o potencial zeta mede a velocidade das partículas através da dispersão de luz, é necessário amostras diluídas. Para o efeito, foram preparadas as amostras diluídas de MWCNT

funcionalizados na fração de volume de 0,02%. Estes nanofluidos diluídos são preparados com o mesmo fluido de base dos nanofluidos originais que serão estudados, garantindo um equilíbrio interfacial semelhante das nanopartículas com o meio. Além disso, os nanofluidos em estudo possuem frações volúmicas de MWCNT baixas, inferiores a um 1,5%. Por conseguinte, o potencial zeta pode ser extrapolado para as frações de volume estudadas (Lamas, 2013). As amostras medidas apresentaram um potencial zeta entre 40 e 60mV, o que sugere uma boa estabilidade, ou seja, baixa probabilidade de aglomeração.

3.5.2 TAXA DE SEDIMENTAÇÃO

Segundo o método *LUMiSizer*, as amostras dos nanofluidos são sujeitas a ciclos de centrifugação que aceleram o processo de sedimentação. Durante estes ciclos, a amostra é intersetada por um feixe de luz infravermelha que é captada continuamente por um sensor. O sensor deteta os gradientes de radiação que atravessam a amostra, permitindo calcular a sua velocidade de sedimentação, uma vez que a quantidade de luz que atravessa a amostra varia com o tempo (Lamas, 2013). A Figura 3.5 apresenta esquematicamente o princípio de funcionamento deste método.

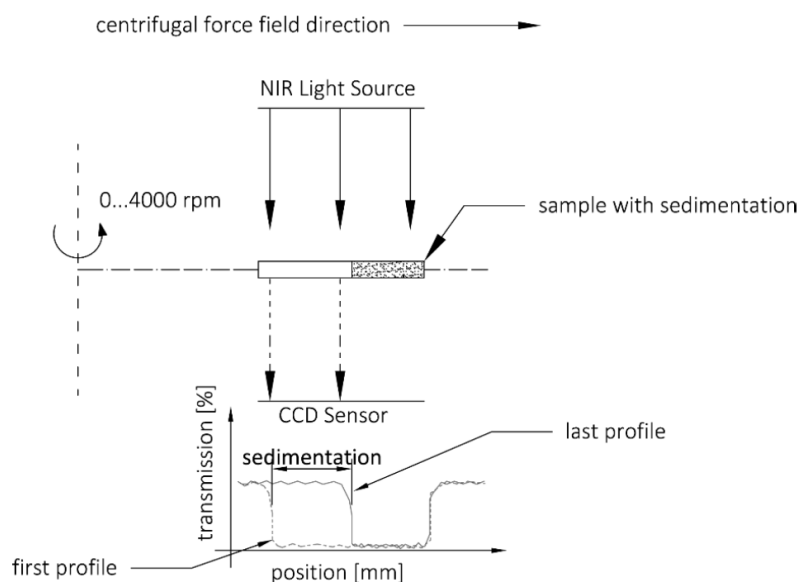


Figura 3.5 – Ilustração esquemática do princípio de medição de um analisador de estabilidade *LUMiSizer* (adaptado de Lamas, 2013).

As amostras de nanofluidos de MWCNT foram testadas a uma temperatura controlada de $298 \pm 1K$, em 3 campos proporcionais de força centrífuga, e o fenómeno da deterioração/deposição de partículas foi medido por uma luz de infravermelho próximo (NIR) (comprimentos de onda de 865nm). Os resultados obtidos indicaram que é possível produzir nanofluidos de longa duração (Lamas, 2013).

3.5.3 AVERIGUAÇÃO DA ESTABILIDADE COLOIDAL

Visto que a metodologia utilizada na produção dos nanofluidos já se encontra bem estabelecida no seio do grupo de investigação, nomeadamente nos trabalhos de Lamas, 2013, não foram realizados testes exaustivos de averiguação da estabilidade dos nanofluidos produzidos. A avaliação realizada consistiu num teste visual ao fluido produzido, averiguando se estavam presentes aglomerados e posteriormente mediu-se a viscosidade dos fluidos.

Assim, para cada nanofluido produzido, com um volume de 50ml ou 100ml, foi medida a sua viscosidade a $25^{\circ}C$, ou $298,15K$, e uma taxa de corte $211,2s^{-1}$. O valor de viscosidade obtido foi utilizado como fator de controlo, da qualidade e estabilidade da dispersão, através da comparação dos valores dos nanofluidos produzidos com os existentes na base de dados do grupo de investigação.

O viscosímetro utilizado para o efeito é um viscosímetro rotacional *Brookfield*, mais especificamente o modelo *DV-III Ultra LV Rheometer*. O seu princípio de funcionamento assenta na medição do momento necessário para rodar um elemento (veio) no fluido. Este veio é acionado por um motor elétrico através de uma mola calibrada. A viscosidade de arrasto, ou resistência ao escoamento, é dada pela deflexão da mola, e é proporcional à velocidade de rotação do veio. As propriedades reológicas do fluido são avaliadas por medições efetuadas usando o mesmo veio a diferentes velocidades.

Nesta investigação usou-se um veio de medição cilíndrico e o controlo de temperatura foi conseguido com um banho térmico externo. A metodologia utilizada na medição da viscosidade compreendeu os seguintes passos:

- 1) Iniciou-se o procedimento verificando se o equipamento se encontrava nivelado, e definiu-se no display o controlo de temperatura externo;

- 2) Iniciou-se o *software* dedicado, RHEOCAL32, e calibrou-se o equipamento.
- 3) O copo cilíndrico de amostragem foi colocado na posição de teste, tendo-se depositado de seguida a amostra com um volume de 6,7ml, utilizando uma pipeta graduada para o efeito;
- 4) Foi inserido o veio de medição no interior do copo cilíndrico seguido do anel de fixação, e acoplou-se o veio ao eixo de rotação;
- 5) Finalmente, foi iniciado o ensaio através do *software*, definindo a temperatura de teste e a taxa de corte a aplicar ao fluido.
- 6) Atingindo a temperatura de ensaio, o *software* iniciou o ciclo de testes, aplicando a taxa de corte definida, registando os valores de viscosidade da amostra. Este procedimento foi repetido mais quatro vezes, perfazendo um total de 5 medições para cada nanofluido ensaiado.

A Tabela 3.4 apresenta sumariamente os resultados dos ensaios de controlo de qualidade dos nanofluidos produzidos, onde são visíveis os valores de viscosidade médios obtidos e respetivos desvios. As amostras, correspondentes a cada volume de nanofluido produzido com 0,25% de MWCNT, foram designadas por 1.n.

Tabela 3.4 – Valores de viscosidade obtidos nos ensaios de verificação da estabilidade da mistura para cada amostra de nanofluido produzida com 0,25% de MWCNT, os respetivos desvios à média e precisão das medições. Apresentam-se ainda os valores médios de todas as amostras, desvio máximo e precisão respetiva.

Nanofluido	Volume [ml]	Viscosidade [cPs]	Desvio [cPs]	Precisão
N1.1	50	2,30	0,01	0,4%
N1.2	100	2,33	0,02	0,7%
N1.3		2,30	0,01	0,4%
N1.4		2,33	0,01	0,4%
N1.5		2,31	0,01	0,4%
N1.6		2,32	0,00	0,0%
N1.7		2,35	0,01	0,4%
N1.8		2,29	0,01	0,4%
N1.9		2,29	0,00	0,0%
N1.10		2,36	0,01	0,4%
Total	950	2,32	0,02	1,0%
		Média global	Desvio global	Precisão global

O mesmo procedimento foi realizado para os nanofluidos produzidos com uma concentração de 0,5% de MWCNT. A Tabela 3.5 apresenta sumariamente os resultados dos ensaios de controlo de

qualidade dos nanofluidos produzidos, designadas por 2.n. Destes nanofluidos foram rejeitados dois, denominados N2.6 e N2.15, por apresentaram um desvio mais elevado que os restantes nanofluidos ao valor médio de viscosidade.

Tabela 3.5 - Valores de viscosidade obtidos nos ensaios de verificação da estabilidade da mistura para cada amostra de nanofluido produzida com 0,5% de MWCNT, os respetivos desvios à média e precisão das medições. Apresentam-se ainda os valores médios de todas as amostras, desvio máximo e precisão respetiva.

Nanofluido	Volume [ml]	Viscosidade [cPs]	Desvio [cPs]	Precisão
N2.1	50	2,56	0,01	0,4%
N2.2	100	2,57	0,01	0,3%
N2.3		2,52	0,02	0,7%
N2.4		2,59	0,01	0,4%
N2.5		2,60	0,01	0,3%
N2.6		2,46	0,01	0,3%
N2.7		2,57	0,00	0,0%
N2.8		2,57	0,01	0,3%
N2.9	50	2,57	0,00	0,0%
N2.10		2,55	0,00	0,0%
N2.11		2,52	0,01	0,3%
N2.12		2,59	0,01	0,3%
N2.13		2,55	0,00	0,0%
N2.14		2,62	0,00	0,0%
N2.15		2,82	0,01	0,4%
Total	800	2,58	0,08	3,1%
		Média global	Desvio global	Precisão global

3.6 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFUIDOS

Na determinação das propriedades termofísicas dos nanofluidos, do fluido base e da água destilada, utilizada na calibração do dispositivo experimental, utilizaram-se diferentes metodologias.

3.6.1 VISCOSIDADE

Os resultados de viscosidade utilizados para cada um dos fluidos testados experimentalmente, que se apresentam-se na Tabela 3.6, na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8, foram retirados da base de dados

cedida pelo grupo de investigação em que este trabalho se insere, tendo sido determinados utilizando um viscosímetro rotacional *Brookfield*, cuja metodologia de medição se apresentou na secção 3.5.3.

Tabela 3.6 – Valores de viscosidade do fluido base (70%AD+30%EG) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.

T [K]	282,37	293,28	298,31	303,27	313,65	323,71	333,86
70%AD+30%EG	0,0035	0,0025	0,0022	0,0020	0,0016	0,0013	0,0012

Tabela 3.7 – Valores de viscosidade do nanofluido com uma concentração de 0,25% de MWCNT (NF0,25%) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.

T [K]	281,76	293,33	297,93	303,08	313,67	323,71	333,82
NF0,25%	0,0038	0,0027	0,0024	0,0022	0,0017	0,0015	0,0013

Tabela 3.8 – Valores de viscosidade do nanofluido com uma concentração de 0,5% de MWCNT (NF0,5%) em função da temperatura, obtidos experimentalmente.

T [K]	283,12	293,29	298,31	303,39	313,36	323,09	333,10
NF0,5%	0,0039	0,0029	0,0026	0,0023	0,0020	0,0016	0,0014

3.6.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica dos fluidos analisados foi igualmente obtida por métodos experimentais, utilizando o dispositivo *KD2-Pro*, cujo princípio de funcionamento assenta no método do fio quente transiente. A metodologia de medição experimental dos fluidos foi desenvolvida por Lamas, 2013, e os resultados utilizados para o desenvolvimento deste trabalho experimental foram uma vez mais retirados da base de dados cedida pelo grupo de investigação, e apresentam-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Valores de condutividade térmica do fluido base (70%AD+30%EG) e dos nanofluidos (NF0,25% e NF0,5%) a diferentes valores de temperatura (Lamas, 2013).

T[K]	283,15	293,15	298,15	303,15	313,15	323,15
70%AD+30%EG	0,441±0,007	0,454±0,002	0,459±0,002	0,463±0,002	0,473±0,002	0,480±0,007
NF0,25%	0,454±0,002	0,463±0,004	0,471±0,001	0,47±0,001	0,476±0,001	0,487±0,002
NF0,5%	0,456±0,002	0,464±0,002	0,466±0,002	0,474±0,001	0,479±0,001	0,490±0,001

3.6.3 DENSIDADE E CALOR ESPECÍFICO

A densidade e o calor específico dos nanofluidos foram determinados utilizando modelos existentes na literatura, nomeadamente a correlação proposta por Pak e Cho (equação 2.1) e o modelo de Xuan e Roetzel, que se traduz na equação 2.3. Para o cálculo do calor específico dos nanofluidos, foi necessário conhecer o calor específico das nanopartículas, tendo-se considerado para o efeito o valor de 750J/(kg.K) (Pradhan *et al.*, 2009).

Quanto ao fluido base, consideraram-se as propriedades previstas teoricamente, que se apresentam na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Propriedades termofísicas do fluido base em função da temperatura (adaptado de (Incropera *et al.*, 2007)).

Temperatura [K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg.K)]
260,9	1056,1	3554,6
266,5	1054,8	3571,3
272,0	1053,4	3588,1
277,6	1051,8	3604,8
283,2	1050,0	3617,4
288,7	1048,1	3634,1
294,3	1046,0	3650,9
299,8	1043,9	3667,6
305,4	1041,5	3684,4
310,9	1039,0	3696,9
316,5	1036,4	3713,7
322,0	1033,5	3730,4

Foi também necessário conhecer as propriedades termofísicas da água destilada, que foi utilizada nos ensaios de validação e calibração do ensaio experimental. No entanto, os equipamentos utilizados na caracterização da viscosidade e condutividade térmica dos fluidos perdem sensibilidade na medição destas propriedades da água, pelo que se optou por considerar os valores de todas as propriedades termofísicas previstos teoricamente e que se encontram na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Propriedades termofísicas da água destilada em função da temperatura (adaptado de (Incropera *et al.*, 2007)).

Temperatura [K]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Viscosidade [Pa.s]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/(kg.K)]
273,15	0,569	0,00175	1000	4217
275	0,574	0,001652	1000	4211
280	0,582	0,001422	1000	4198
285	0,59	0,001225	1000	4189
290	0,598	0,00108	999,0	4184
295	0,606	0,000959	998,0	4181
300	0,613	0,000855	997,0	4179
305	0,62	0,000769	995,0	4178
310	0,628	0,000695	993,0	4178
315	0,634	0,000631	991,1	4179
320	0,64	0,000577	989,1	4180
325	0,645	0,000528	987,2	4182
330	0,65	0,000489	984,3	4184
335	0,656	0,000453	982,3	4186
340	0,66	0,00042	979,4	4188
345	0,668	0,000389	976,6	4191
350	0,668	0,000365	973,7	4195
355	0,671	0,000343	970,9	4199
360	0,674	0,000324	967,1	4203
365	0,677	0,000306	963,4	4209
370	0,679	0,000289	960,6	4214
373	0,68	0,000279	957,9	4217

CAPÍTULO 4

MODELO EXPERIMENTAL

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

4.1.1 EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Em 2010, Abreu propôs e construiu um dispositivo experimental com o propósito de caracterizar o fenómeno da transferência de calor por convecção de nanofluidos (Abreu, 2010). Posteriormente, em 2013, Fernandes (2013) implementou um conjunto de melhorias ao equipamento inicial. A Figura 1.1 apresenta o dispositivo final (Fernandes, [s.d.]).

O equipamento desenvolvido, representado esquematicamente na Figura 4.2, consiste num circuito fechado, onde escoia o fluido que se pretende caracterizar. A secção de teste do equipamento corresponde a um segmento reto de tubo (Figura 4.2 – 10), cuja parede é sujeita a um fluxo de calor constante imposto por uma banda resistiva (Figura 4.2 – 9). Ao longo da parede exterior do canal, distanciados axialmente 127mm, encontram-se instalados doze termopares (Figura 4.2 – 14), que monitorizam a temperatura da parede exterior do tubo. Existem ainda dois termopares no interior do canal, na secção de entrada e saída (Figura 4.2 – 13 e 15), que monitorizam a temperatura a que o fluido entra e sai na zona de teste. Além da secção de teste, o circuito possui um permutador de calor líquido-líquido em contracorrente (Figura 4.2 – 11), cuja temperatura é controlada por um banho térmico (Figura 4.2 – 12), o que possibilita o arrefecimento do fluido até à temperatura inicial antes de este retornar ao depósito (Figura 4.2 – 1). Adicionalmente, colocaram-se duas sondas (Figura 4.2 – 16 e 17), a fim de conhecer a temperatura do fluido à entrada e saída do permutador de calor

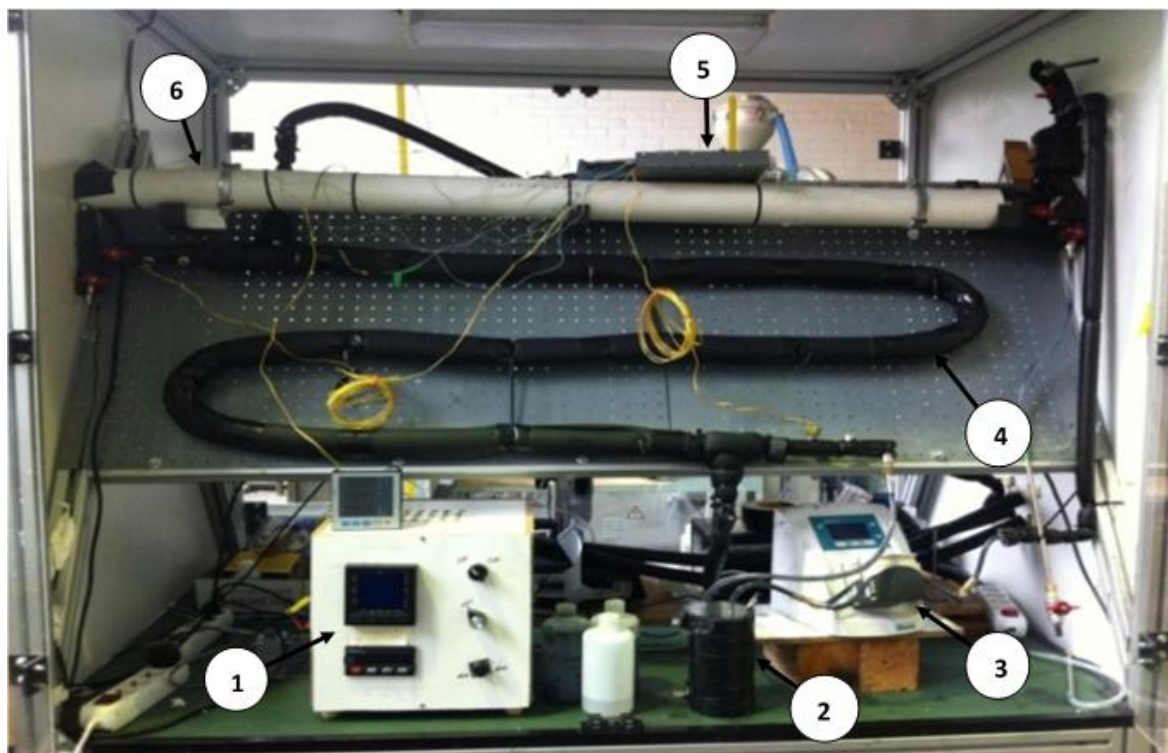


Figura 4.1 – Dispositivo experimental utilizado na realização do trabalho experimental. Principais referências ao equipamento: 1– Analisador de energia; 2 – Reservatório; 3– Bomba peristáltica; 4 – Zona arrefecimento do fluido; 5– Sistema de aquisição de dados dos termopares; 6 – Secção de teste; Adaptado de Fernandes (2013).

O caudal do escoamento é definido manualmente na bomba peristáltica (Figura 4.2 – 2), assim como o fluxo de calor imposto, que é estabelecido pelo analisador de energia (Figura 4.2 – 5), através da definição da potência imposta à banda resistiva. Uma terceira condição de ensaio é definida pela temperatura de entrada do fluido na secção de teste, definida com o auxílio do permutador de calor.

Uma vez estabelecidas as condições de ensaio, ou seja, o número de Reynolds do escoamento, o fluxo de calor e a temperatura de entrada do fluido, é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, através da monitorização das leituras dos termopares (Figura 4.2 – 7) por um sistema de aquisição de dados *Omega* e um *software* dedicado denominado *DaisyLab* (Figura 4.2 – 8 e 6).

De modo a minimizar as perdas de calor para o exterior, o circuito onde escoo o fluido encontra-se revestido por materiais isolantes. Por outro lado, à entrada e à saída da zona de ensaios foram colocadas válvulas (Figura 4.2 – 3) para evitar a presença de bolhas de ar nos canais de escoamento, e um reservatório (Figura 4.2 – 4) para controlar o fluxo à entrada da secção de testes.

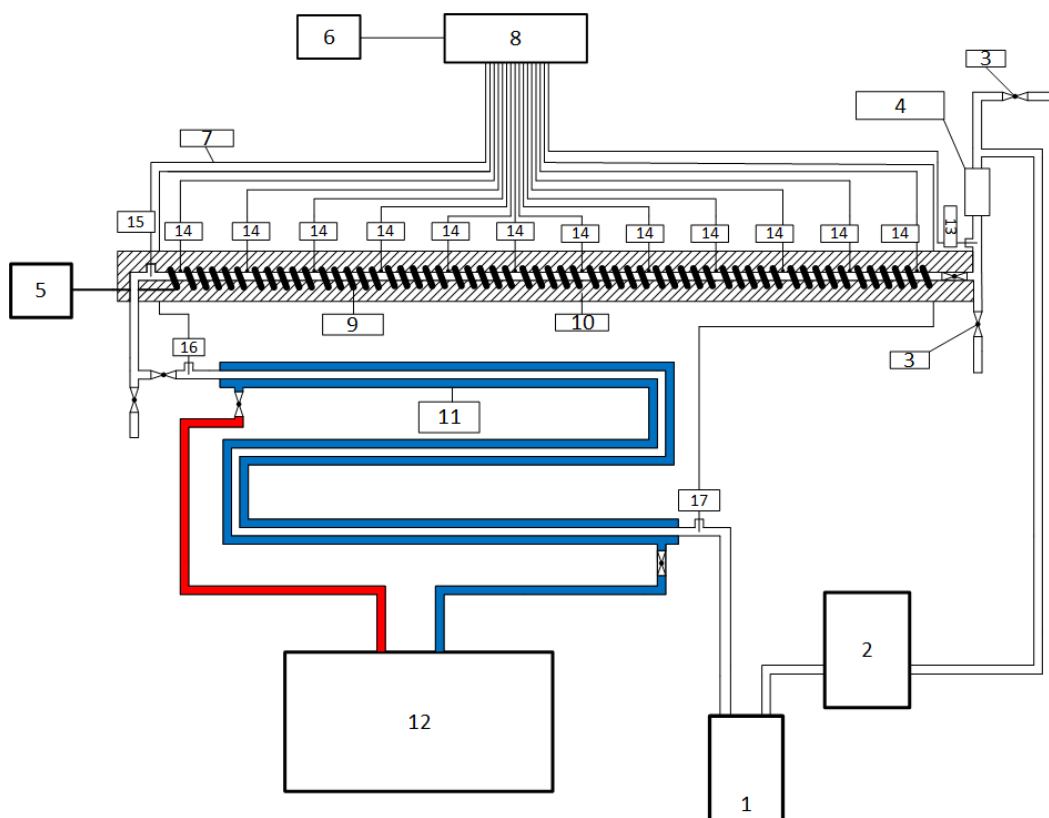


Figura 4.2 - Desenho esquemático do dispositivo experimental de transferência de calor por convecção (Fernandes, [s.d.]).

O equipamento possui ainda um segmento adicional, que compreende um circuito fechado entre o reservatório (Figura 4.2 – 1) e a válvula inferior (Figura 4.2 – 3), que possibilita a calibração do caudal de escoamento que se pretende à entrada da secção de ensaios.

A Tabela 4.1 apresenta as características gerais do equipamento desenvolvido por Fernandes (2013).

Tabela 4.1 – Principais características do equipamento desenvolvido por Fernandes (2013).

Características do equipamento	
Comprimento total da secção de teste	1420mm
Diâmetro interno da tubagem	6mm
Diâmetro externo da tubagem	8mm
Número total de termopares	16
Número de termopares de superfície	12
Distância entre termopares	127mm
Volume mínimo de fluido	500ml

4.1.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O desempenho dos fluidos operantes na transferência de calor por convecção é tipicamente caracterizado pelo coeficiente de transferência de calor por convecção, que não pode ser obtido por medição direta. Contudo, este coeficiente pode ser calculado por correlações teóricas de variáveis medidas experimentalmente, como a temperatura.

Segundo a lei do arrefecimento de Newton, o fluxo de calor por convecção, q''_{conv} , pode ser calculado por:

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad 4.1$$

onde h é o coeficiente local de transferência de calor por convecção, T_s a temperatura da superfície sólida e T_∞ é a temperatura de corrente livre.

No contexto deste trabalho experimental, a temperatura de corrente livre diz respeito à temperatura do fluido ao longo do eixo do tubo da secção de teste, e por isso será designada por T_f , enquanto que T_s corresponde à temperatura da parede interna da tubagem. Assim, o coeficiente local de transferência de calor por convecção experimental, h_{exp} , para uma dada posição axial, x , pode ser determinado segundo a equação 4.2.

$$h_{exp}(x) = \frac{q''_{conv}}{T_s(x) - T_f(x)} \quad 4.2$$

No entanto, verificou-se ser impossível a monitorização da temperatura ao longo da parede interior do tubo, devido a problemas relacionados com a estanquicidade do sistema experimental. Desta forma, a temperatura foi calculada, em cada posição x , considerando os pressupostos de regime estacionário e a condução de calor sem geração de energia. Partindo desta análise, a forma apropriada para a equação de calor para um sistema cilíndrico segundo a direção radial é

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad 4.3$$

A taxa na qual a energia é conduzida através de uma superfície cilíndrica pode ser expressa de acordo com a lei de Fourier, isto é:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad 4.4$$

em que $A = 2\pi rL$ é a área normal à direção da transferência de calor. Uma vez que a grandeza $\left(kr \frac{dT}{dr}\right)$ presente na equação 4.3 é constante, compreende-se que a taxa de transferência de calor por condução q_r , e não o fluxo q_r'' , é constante na direção radial. Assim, a distribuição de temperaturas na superfície interna da tubagem, resulta da integração da equação 4.4, ou seja,

$$T_s(x) = T_{s,e}(x) - \frac{q_r}{2\pi k_t L} \ln\left(\frac{D + 2e}{D}\right) \quad 4.5$$

onde $T_{s,e}$, é a temperatura da parede externa do tubo, k_t é a condutividade do material da tubagem que é considerada constante, D é o seu diâmetro interno, e é a espessura e L é o comprimento total da secção de testes. Por sua vez, o fluxo de calor na parede interna da tubagem, q_{conv}'' , pode ser determinado considerando a condição de fronteira imposta na parede interna do tubo, isto é

$$q_{conv}''(r_1) = q_r''(r_1) \quad 4.6$$

onde r_1 é o raio interno da tubagem, que resulta na expressão:

$$q_{conv}''(r_1) = \frac{q_r}{A_{sup}} = \frac{q_r}{\pi DL} \quad 4.7$$

em que q_r é a potência da banda resistiva e A_{sup} é a área superficial da secção interna da tubagem cilíndrica.

Por outro lado, a temperatura média do fluido pode ser calculada pela conservação da energia. Num escoamento uniaxial de um fluido no interior de uma tubagem, com um caudal mássico constante, \dot{m} , a transferência de calor por convecção ocorre na superfície interna do tubo. Neste caso, são consideradas desprezáveis as variações de energia cinética e potencial do fluido, assim como a transferência de energia por condução na direção axial. Desta forma, pode considerar-se que o único efeito significativo se encontra associado à variação de energia térmica, já que é razoável considerar os fluidos que se pretendem caracterizar como líquidos incompressíveis, e por isso também não existe trabalho de fluxo.

Assim, aplicando a lei da conservação de energia a um volume de controlo diferencial, como se representa na Figura 4.3,

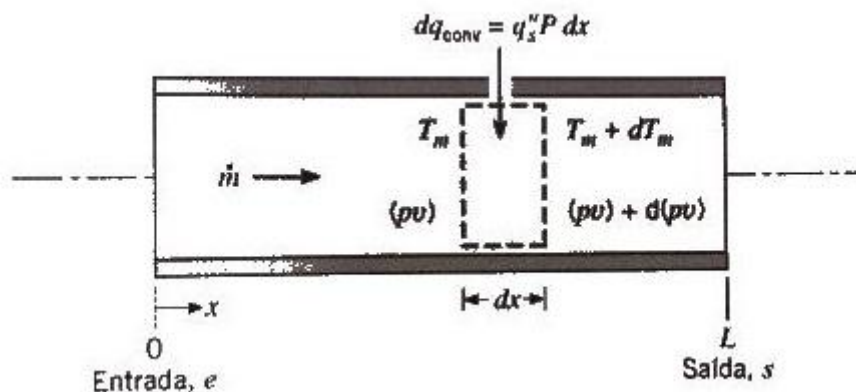


Figura 4.3 – Esquematização da aplicação da lei da conservação de energia a um volume de controlo diferencial (adaptado de (Incropera *et al.*, 2007)).

A lei da conservação da energia reduz-se à expressão:

$$dq_{conv} = \dot{m}c_p dT_f \quad 4.8$$

em que c_p é o calor específico do fluido a pressão constante, e dT_f é a temperatura média (ou de mistura) do fluido numa dada secção transversal, e é definido em termos da energia térmica transportada pelo fluido, conforme ele passa pela secção transversal. Integrando a equação 4.8 a partir da entrada do tubo de teste para a saída do mesmo, obtém-se:

$$q_{conv} = \dot{m}c_p(T_{f,s} - T_{f,e}) \quad 4.9$$

Este balanço térmico ao sistema é uma expressão geral que se aplica independentemente das condições da superfície térmica ou das condições de escoamento no tubo. A equação 4.8 pode ser escrita de uma forma conveniente, expressando a taxa de transferência de calor por convecção na forma de elemento diferencial

$$dq_{conv} = q_s'' P dx \quad 4.10$$

em que q_s'' é o fluxo de calor na superfície da tubagem, P é o perímetro da superfície ($P=\pi D$ para um tubo circular) e dx é a distância infinitesimal a partir da entrada da secção de testes. Substituindo na expressão 4.8 que segue

$$q_s'' P dx = \dot{m} c_p dT_f \quad 4.11$$

Uma vez mais, integrando a equação 4.11 a partir de $x = 0$ resulta

$$T_f(x) = T_{f,e} + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} x \quad 4.12$$

onde $T_{f,e}$ é a temperatura do fluido na entrada da secção de ensaios. Para um fluxo de calor constante na superfície, e uma vez que este é independente da posição axial, tem-se

$$q_{conv} = q_s'' (P \times L) \quad 4.13$$

Estabelecidos todos os pressupostos necessários à compreensão do problema em estudo, é agora possível caracterizar o coeficiente experimental de transferência de calor por convecção, com recurso à formulação matemática proposta. Contudo, o problema não é simples, pois depende de diversas propriedades do fluido tais como a densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico. O coeficiente depende também da geometria da superfície e das condições de escoamento. Esta multiplicidade de variáveis independentes é atribuída à dependência da transferência de calor por convecção das camadas limites que se desenvolvem na superfície do escoamento (Incropera *et al.*, 2007).

4.1.3 INCERTEZA EXPERIMENTAL

Dada a natureza experimental do trabalho a desenvolver, os resultados obtidos com recurso ao equipamento e formulação matemática inerente não são valores absolutos, tendo uma incerteza associada devido aos possíveis erros aleatórios e sistemáticos intrínsecos ao problema. A análise e tratamento dos erros sistemáticos e aleatórios são realizados por métodos distintos. A análise dos erros de carácter sistemático, que afetam a exatidão dos resultados, é um processo mais elaborado que a análise e tratamento dos erros aleatórios, que condicionam a precisão dos dados. Isto deve-

se ao facto de a condição necessária para corrigir os erros sistemáticos, total ou parcialmente, ser o conhecimento da sua origem. Já os erros aleatórios, como apresentam origem subjetiva, só podem ser detetados pela repetição das observações, podendo ser minimizados através de métodos que possibilitam a sua análise estatística.

A incerteza experimental associada à presença de erros aleatórios pode ser determinada através da lei da propagação dos erros, que possibilita o cálculo da propagação das incertezas associadas aos valores medidos através do processo de medição para os resultados finais. A lei da propagação dos erros para uma função de multivariáveis, neste caso o coeficiente de transferência de calor por convecção, é definida pela equação 4.18.

$$\Delta h_{exp}(x) = \left| \left(\frac{\partial h_{exp}}{\partial P} \right) \right| \Delta P + \left| \left(\frac{\partial h_{exp}}{\partial D} \right) \right| \Delta D + \left| \left(\frac{\partial h_{exp}}{\partial L} \right) \right| \Delta L + \left| \left(\frac{\partial h_{exp}}{\partial T_s} \right) \right| \Delta T_s(x) + \left| \left(\frac{\partial h_{exp}}{\partial T_f} \right) \right| \Delta T_f(x) \quad 4.14$$

Contudo, a dependência da função das diversas variáveis não é traduzida por apenas uma equação, mas sim por um conjunto de equações dependentes, o que torna difícil aplica-la para o cálculo da incerteza experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção experimental. Em alternativa, pode aplicar-se o método direto de cálculo dos erros, que é válido qualquer que seja a dimensão do erro (*Série II / Número 95 | Química - Boletim da SPQ | Sociedade Portuguesa de Química*, [s.d.]). O procedimento deve ser o que se indica a seguir:

- 1) Calcula-se o valor f_0 de f para os valores de x_i , recolhidos experimentalmente;
- 2) Calculam-se k valores de f definidos por

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_k) \quad 4.15$$

Onde a variável i é acrescentada do seu erro;

- 3) Determina-se o erro em f pela expressão

$$\Delta f = \sum_i^k (f_i - f_0) \quad 4.16$$

Ao utilizar esta metodologia, se os erros forem pequenos, este método conduz ao mesmo valor que a aplicação da lei da propagação dos erros. No caso de os erros já serem significativos o método

direto permite obter estimativas do erro mais realistas (*Série II / Número 95 | Química - Boletim da SPQ | Sociedade Portuguesa de Química, [s.d.]*).

Para determinar a incerteza experimental associada ao coeficiente de transferência de calor por convecção foi necessário identificar os erros experimentais inerentes a cada variável. A Tabela 4.2 apresenta sumariamente o erro considerado para cada variável independente e a forma como este foi determinado. Os erros associados aos valores obtidos experimentalmente foram determinados por análise estatística de uma distribuição normal ou *t-student*, de acordo com o tamanho da amostra considerada, com um intervalo de confiança a 95%.

Tabela 4.2 – Listagem dos erros associados às diversas variáveis envolvidas na determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção, com os respetivos valores em unidades do sistema internacional (SI).

Variável	Descrição	Erro [SI]
Valores de temperatura do termopar de entrada	Erro majorado para um intervalo de 95% com uma amostragem de 1153 medições	5,00E-03
Valor de temperatura dos termopares de superfície	Erro majorado para um intervalo de 95% com uma amostragem de 1153 medições	3,00E-02
Potência da banda resistiva	Erro majorado para um intervalo de 95% com uma amostragem de 372 medições	2,60E-01
Comprimento da secção de ensaios	Valor retirado da dissertação de Fábio Fernandes (2013)	1,00E-03
Posição axial na secção de ensaios	Valor retirado da dissertação de Fábio Fernandes (2013)	1,00E-03
Diâmetro da tubagem	Valor retirado da dissertação de Fábio Fernandes (2013)	1,00E-05
Caudal volumétrico do escoamento	Erro majorado para um intervalo de 95% com uma amostragem de 5 medições numa proveta com um erro de 0,5ml	1,20E-07
Condutividade da tubagem	Considerada a ordem do menor número significativo	1,00E-01
Viscosidade	Erro majorado para um intervalo de 95% com uma amostragem de 140 medições	1,00E-04
Condutividade	Valor retirado da dissertação de Bruno Lamas (2013)	1,00E-03
Densidade Fluido base e água	Considerada a ordem do menor número significativo	1,00E-01
Calor específico Fluido Base	Considerada a ordem do menor número significativo	1,00E+00
Espessura da tubagem	Considerado o mesmo valor que o diâmetro	1,00E-05
Densidade de MWCNT	Considerado 5% do valor do fabricante	1,08E+02
Calor específico do Nanofluido	Erro majorado considerando a lei da propagação de erros	-2,71E+01
Densidade do Nanofluido	Erro majorado considerando a lei da propagação de erros	3,40E+00
Fração volúmica de MWCNT	Majoração do erro para uma preparação de 50ml de nanofluido	2,50E-03
Calor específico de MWCNT	Considerado 10% por não se apresentar no artigo consultado	7,50E+01

4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

Após ter sido estabelecida a metodologia experimental, a formulação matemática do problema em estudo e a sua respetiva incerteza, procedeu-se à calibração e validação do modelo experimental proposto, com vista a aferir a sua adequabilidade para a caracterização do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos.

4.2.1 AVERIGUAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS TERMOPARES

Numa primeira fase do trabalho experimental foi necessário averiguar o desempenho de todos os componentes do sistema. Para o efeito, realizou-se um conjunto de ensaios com o objetivo de verificar o funcionamento dos termopares instalados.

Inicialmente, registaram-se as temperaturas dos termopares com todos os outros equipamentos desligados. Uma vez que o sistema se encontra bem isolado, espera-se que a temperatura seja uniforme no seu interior. O gráfico da Figura 4.4 apresenta os valores médios obtidos para cada termopar de uma amostra de 150 leituras, registadas para intervalos de 2 segundos

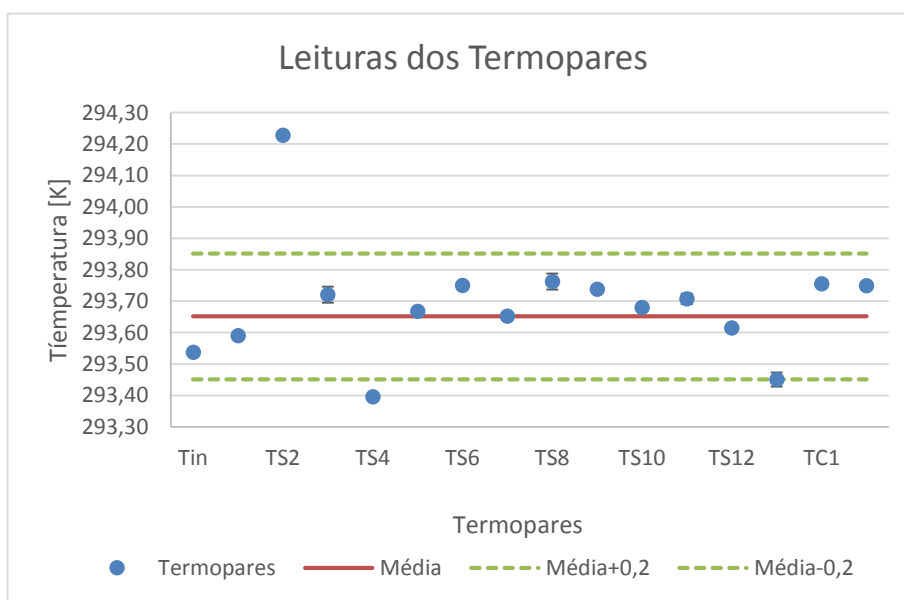


Figura 4.4 – Valores de temperatura registados para cada um dos termopares instalados no equipamento experimental e respetivos valores médios e desvios, sem presença de escoamento de fluido.

. No gráfico são também representados os valores médios de todas as leituras registadas, bem como o respetivo erro calculado para um intervalo de confiança de 95%, considerou-se ainda um

erro em relação à média de 0,2K correspondente à incerteza associada às leituras dos termopares instalados.

Realizou-se um novo conjunto de ensaios semelhantes aos anteriores, desta vez com um fluido a escoar no interior do circuito. A recolha de dados foi realizada da forma descrita anteriormente, após a estabilização do sistema. Os fluidos utilizados nestes testes foram a água destilada e uma diluição de 30% de etilenoglicol em água, ou seja, o fluido base utilizado na produção dos nanofluidos em estudo. Para cada um destes fluidos, foram impostas as velocidades de escoamento correspondentes a números de Reynolds de 1000 e 2000, considerando propriedades a 20°C, ou 293,15K.

O gráfico de Figura 4.5 apresenta os resultados obtidos, para um ensaio realizado com fluido base com um caudal de 1189ml/min, correspondente a um Reynolds de 2000 e os respetivos erros dos termopares.

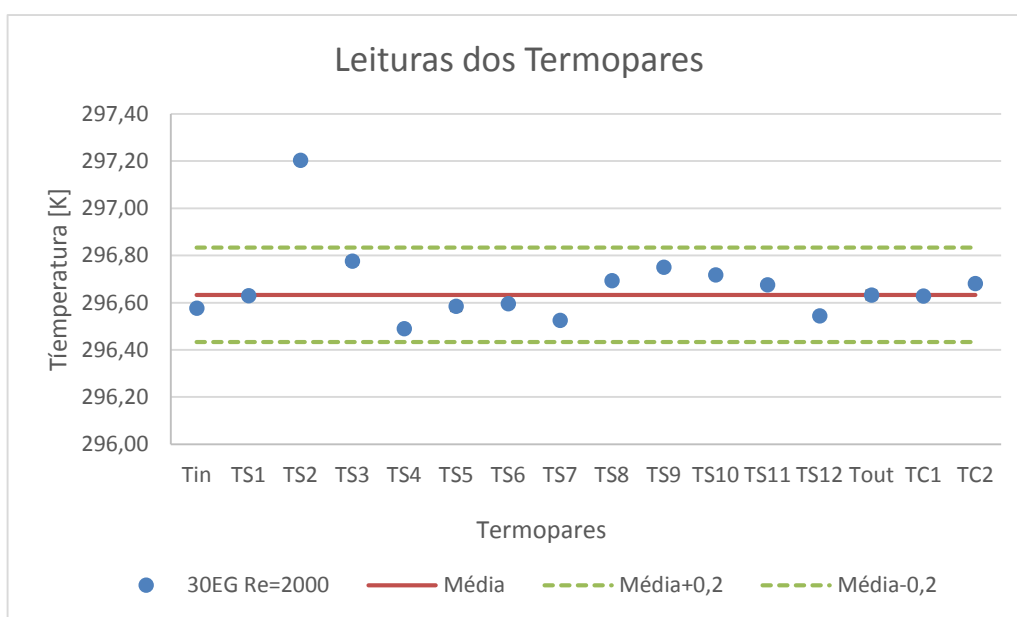


Figura 4.5 - Valores de temperatura registados para cada um dos termopares instalados no equipamento experimental e respetivos valores médios e desvios, com presença de escoamento de fluido base.

Face aos resultados dos ensaios de averiguação do funcionamento dos termopares, foram desprezadas as leituras do termopar de superfície TS2, uma vez que os seus registos não se encontram no intervalo da temperatura média em todos os ensaios realizados.

4.2.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia adotada na realização dos ensaios no equipamento experimental *in situ*, com vista a caracterização do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos, compreendeu os seguintes passos:

- 1) Foram calibrados os termopares através do *software* dedicado associado ao módulo de aquisição de dados;
- 2) Verificou-se o nível de fluido no reservatório, que deve conter pelo menos 500ml, e as válvulas de fluxo foram posicionadas no sentido do circuito de calibração do escoamento.
- 3) Ligar a bomba peristáltica e realizar uma purga de modo a eliminar as bolhas de ar que possam existir no sistema.
- 4) Depois de ligada a bomba, foi definido o caudal volúmico pretendido, e iniciada a dosagem de calibração, que corresponde à bombagem do volume de fluido por um período de 10 segundos sob o caudal designado. Neste procedimento foi tida em consideração a abertura e fecho da válvula inferior (Figura 4.2 – 3) no momento imediatamente antes e após o ciclo de dosagem, de forma a evitar a entrada de ar no circuito, que influencia o volume da amostra fluido.
- 5) Recorrendo a uma proveta graduada, verificou-se se o volume de calibração correspondia ao valor imposto pela bomba peristáltica e este foi corrigido no aparelho sempre que necessário.
- 6) O procedimento foi repetido até se registarem 5 medições do volume de calibração definido na bomba.
- 7) Uma vez calibrado o caudal pretendido, as válvulas de fluxo foram colocadas na posição necessária à realização do ensaio e, de seguida, foi ligado o banho térmico que possibilita o controlo da temperatura do fluido em estudo.
- 8) Posteriormente, foi ligada a banda resistiva, definindo uma potência tida como constante de 125W.
- 9) Aguardou-se a estabilização do sistema até este atingir a entrada da secção de ensaio a temperatura de escoamento desejada, ajustando o caudal e a temperatura do banho térmico sempre que necessário.

- 10) Finalmente, foi iniciado o registo de temperatura utilizando o Software respetivo em intervalos de 2 segundos, e o registo de potência da banda resistiva em intervalos de 5 segundos.

Os dados referentes às leituras dos termopares e a potência da banda resistiva foram recolhidos durante 1 hora para os ensaios de calibração com água destilada e diluições de 30% de etilenoglicol em água, e por um período de 30 minutos nos ensaios com nanofluidos.

4.2.3 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

Após ter sido estabelecida a metodologia experimental, procedeu-se à validação do modelo experimental, que consistiu em utilizar o equipamento para caracterizar um fluido cujo comportamento é bem conhecido, como é o caso da água. Além da utilização de água destilada nos ensaios de calibração e validação do modelo, foram também realizados testes com o fluido base, e estes foram igualmente tidos como referência para a calibração do equipamento.

Para cada um dos ensaios realizados, foram impostas condições, definidas pelo número de Reynolds, temperatura de entrada na secção de teste e fluxo de calor, que foi mantido constante de 125W em todos os ensaios realizados. A Tabela 4.3 apresenta resumidamente as condições estabelecidas e o número de ensaios realizados para cada conjunto de parâmetros.

Tabela 4.3 – Resumo das condições testadas com cada um dos fluidos: água destilada e fluido base (70%AD+30%EG), e o número de ensaios realizados em cada situação.

Re	Água destilada		70%AD+30%EG	
	293,15K	313,15K	293,15K	313,15K
1000	2	2	2	2
1200	2	.	.	.
1400	2	.	2	.
1500	5	5	5	5
1600	2	.	2	.
1800	2	.	.	.
2000	2	2	2	2
2200	2	.	.	.

Para conhecer a velocidade de escoamento correspondente a cada número de Reynolds estabelecido, foi necessário conhecer as propriedades termofísicas do fluido, nomeadamente a sua

densidade e viscosidade. Estas propriedades foram calculadas tomando como referência a temperatura definida para a entrada da secção de testes. No entanto, uma vez que o fluido é aquecido ao percorrer a secção de testes, as suas propriedades termofísicas foram corrigidas para os valores correspondentes à temperatura média de cada ensaio, calculada como se apresenta na equação 4.17, onde T_e e T_s são as temperaturas dadas pelos termopares à entrada e saída da secção de testes. Consequentemente,

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad 4.17$$

Consequentemente, os números de Reynolds corrigidos diferem dos valores considerados inicialmente, embora a variação entre o valor considerado e o real não foi superior a 5%.

4.2.3.1 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

Após a execução de todos os testes, e do cálculo dos respetivos valores do coeficiente de transferência de calor por convecção para cada posição axial, conforme descrito na secção 4.1.2, realizou-se uma avaliação aos resultados do ponto de vista da sua repetibilidade. Para tal, foram calculadas as médias para cada par de condições fronteira, isto é, número de Reynolds e temperatura de entrada do ensaio, e os respetivos desvios percentuais. A Figura 4.6 apresenta a avaliação de repetibilidade para os ensaios realizados com fluido base para uma temperatura de 313,15K e um número de Reynolds de 1500.

Ao observar a Figura 4.6, é possível constatar que os ensaios realizados nas condições acima descritas não apresentam um desvio à média superior a 10%. De notar que não se apresentam os resultados correspondentes ao termopar TS2, depois de este ter sido rejeitado nos ensaios de avaliação preliminares.

Com a avaliação de repetibilidade levada a cabo, foi possível verificar que os resultados não apresentam desvios superiores a 10% da média. Dada a natureza do equipamento experimental, considerou-se existir uma repetibilidade aceitável dos ensaios, não tendo sido rejeitado qualquer dos ensaios realizados. Os gráficos correspondentes às restantes avaliações podem ser consultados nos Anexos.

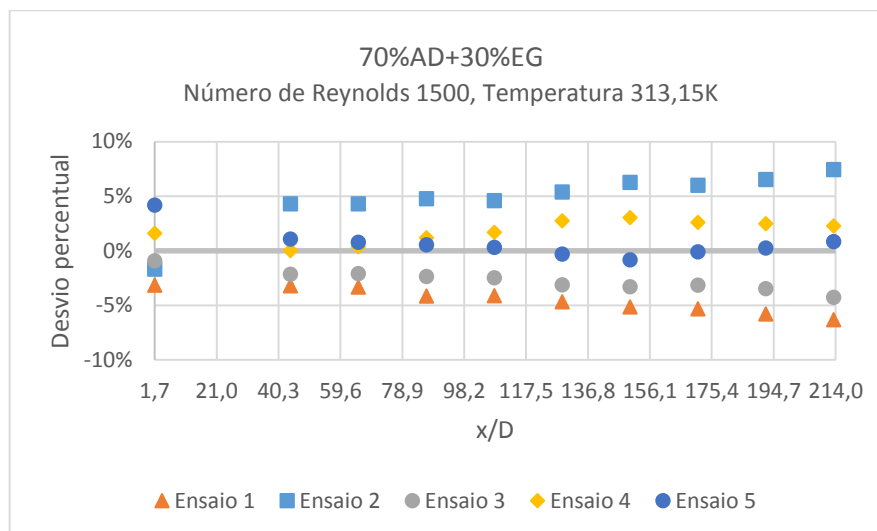


Figura 4.6 - Desvio percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

4.2.3.2 VALIDAÇÃO PELO MODELO TEÓRICO

Para completar a validação do modelo experimental, recorreu-se ao cálculo experimental do número de Nusselt, Nu_{exp} , para cada posição axial e para todos os ensaios realizados, recorrendo à equação

$$Nu_{exp} = \frac{h_{exp}}{D} k \quad 4.18$$

onde D é o diâmetro interno de tubagem e k é a condutividade térmica do fluido. Uma vez que o número de Nusselt depende das propriedades termofísicas do fluido e das condições de escoamento, os resultados de todos os ensaios realizados foram representados em função do número inverso de Graetz ao invés da posição axial adimensional. O número de Graetz é um número adimensional que caracteriza o escoamento laminar numa conduta e define-se pela equação

$$Gz = \frac{DRePr}{L} \quad 4.19$$

A representação dos resultados de todos os ensaios segundo este número permite a avaliação conjunta dos ensaios realizados sob diferentes condições de escoamento, temperatura e fluido, e a sua validação com a expressão teórica, o modelo de Shah.

4.2.3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM REGIME LAMINAR

Tal como se encontra descrito na revisão da literatura, na secção 2.5.1, as investigações experimentais desenvolvidas com o propósito de caracterizar a transferência de calor por convecção forçada em regime laminar, são frequentemente validadas pelo modelo de Shah que se define como

$$Nu = \begin{cases} 1,953Gz^{\frac{1}{3}} & Gz \geq 33,3 \\ 4,364 + 0,0722Gz & Gz < 33,3 \end{cases} \quad 4.20$$

Contudo, o cálculo do número de Nusselt depende do desenvolvimento do escoamento, isto é, do comprimento de desenvolvimento hidrodinâmico e térmico do fluido. Para cada escoamento, existe uma região de entrada onde o escoamento se encontra em desenvolvimento, ou seja, que a camada limite térmica e hidrodinâmica se estão a desenvolver, e uma segunda região, a partir da qual o escoamento é completamente desenvolvido, como se encontra representado pela Figura 4.7 e pela Figura 4.8.

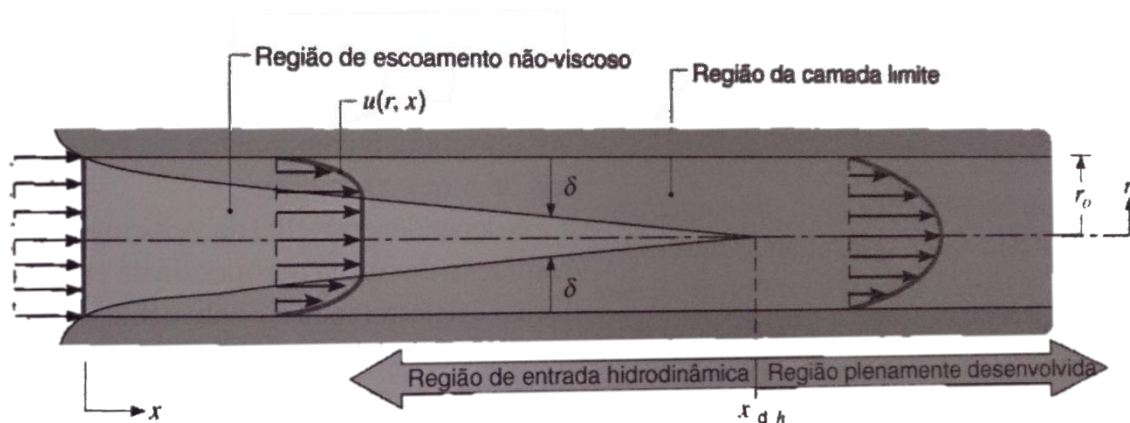


Figura 4.7 - Desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica para um escoamento laminar no interior de um tubo circular (adaptados de (Incropera *et al.*, 2007)).

Em regime laminar, o comprimento de entrada hidrodinâmico, x_h , ou seja, o comprimento a partir do qual o perfil de velocidade do escoamento interno não varia com a posição axial do tubo, é dado pela equação

$$x_h = 0,05DRe \quad 4.21$$

Por outro lado, ao mesmo tempo que o escoamento se desenvolve hidrodinamicamente desde a entrada do tubo, este também se desenvolve termicamente devido ao gradiente de temperatura, imposto pelas condições de fluxo constante na parede.

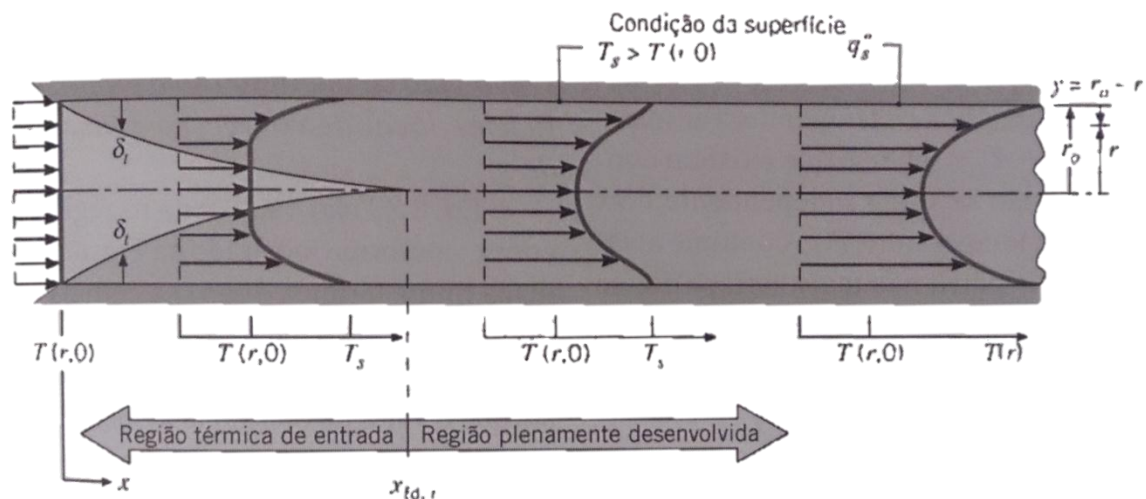


Figura 4.8 - Desenvolvimento da camada limite térmica para um escoamento laminar no interior de um tubo circular (adaptados de (Incropera *et al.*, 2007)).

Assim, para um escoamento interno em regime laminar, o comprimento de entrada termodinâmico é calculado por

$$x_t = 0,05DRePr \quad 4.22$$

Um olhar mais atento permite descrever o comprimento de desenvolvimento térmico como

$$Gz = 20 \quad 4.23$$

Desta forma, na região de entrada, onde a camada limite térmica se começa a desenvolver, o coeficiente de transferência de calor por convecção é extremamente alto para $x=0$, e diminui com a distância axial. Depois de se alcançarem as condições de desenvolvimento térmico, e considerando as propriedades do fluido constantes, o coeficiente local de convecção é uma constante, independente da posição axial. Contudo, devido às limitações experimentais, uma vez que o comprimento de desenvolvimento termodinâmico é superior ao da secção de testes, a

caracterização do coeficiente de transferência de calor por convecção compreende somente a região de desenvolvimento do fluido.

4.2.3.2.2 COMPARAÇÃO COM MODELO TEÓRICO

No gráfico da Figura 4.9 encontra-se representada a equação de Shah e os valores do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, assim como as respectivas incertezas experimentais. Estas incertezas dos valores do número de Nusselt experimental e do número de Graetz inverso foram determinadas de acordo com a metodologia utilizada na determinação da incerteza experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção.

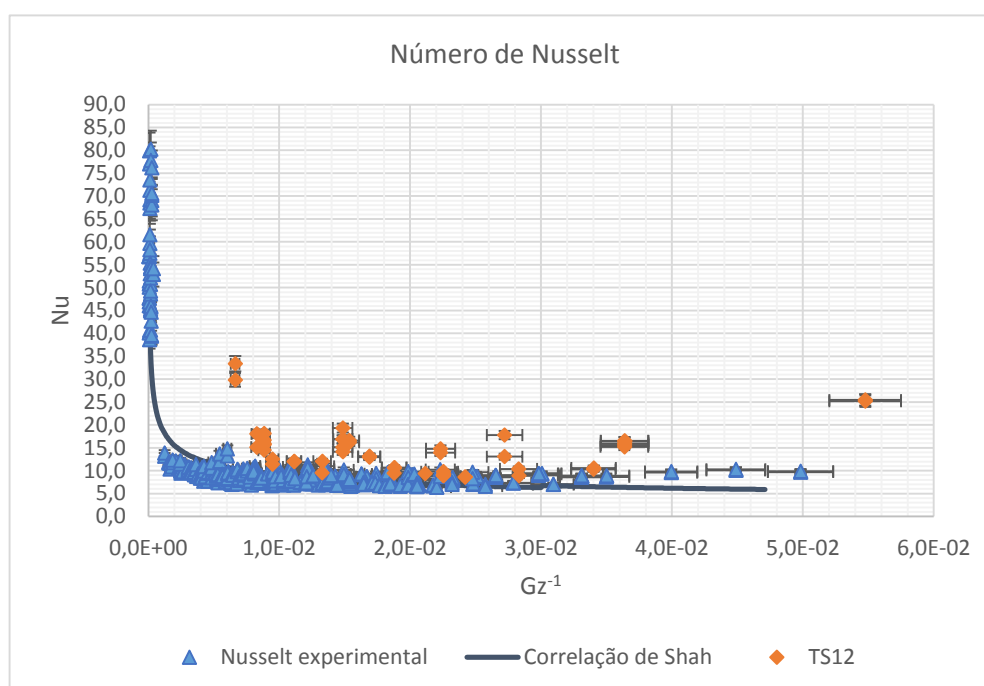


Figura 4.9 – Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com água destilada e fluido base.

É possível constatar que existem pontos claramente desfasados da restante nuvem de dados. Estes pontos dizem respeito às leituras do último termopar de superfície, colocado na posição axial 1,408m. Apesar do desfasamento não ter sido evidente durante a realização dos ensaios preliminares, este revelou-se com a imposição de um gradiente de temperatura. Como tal, não foram consideradas as leituras correspondentes a este termopar no decorrer da investigação experimental. Apesar de, numa primeira análise, a nuvem apresentar dados consistentes com o comportamento da equação de Shah, à exceção dos valores correspondente ao termopar TS2, verificou-se que a maioria dos pontos apresenta desvios superiores a 10% dos valores previstos

pela correlação teórica, sendo superiores ao erro experimental determinado, que é de, aproximadamente, 5% do valor de Nusselt experimental obtido em cada posição axial. Face a esta evidência, percebe-se que a exatidão do equipamento experimental não se encontra assegurada, embora os ensaios possuam uma repetibilidade aceitável, pelo que foi necessário identificar se existiriam erros sistemáticos presentes na metodologia utilizada ou no equipamento experimental.

4.2.3.2.3 IDENTIFICAÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS

Em 2013, Abreu *et al.* identificaram, na sua investigação experimental com o aparato desenvolvido, a presença de um erro sistemático nos ensaios realizados. No seu trabalho, o desvio presente entre os resultados experimentais e os valores teóricos foi atribuído à presença de uma resistência de contacto entre os termopares de superfície e o tubo de testes, resultante do modo de fixação destes à superfície da tubagem como se apresenta da Figura 4.10.

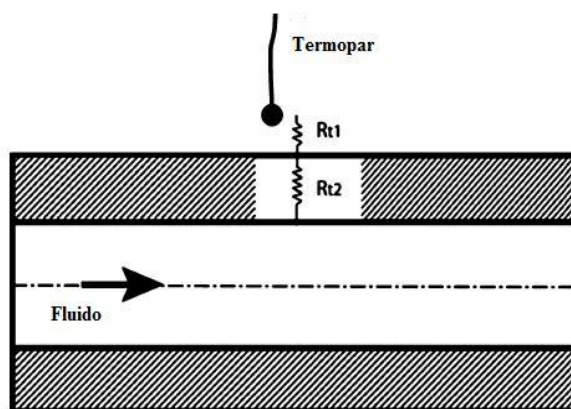


Figura 4.10 – Representação do modelo proposto para o cálculo da resistência de contacto (adaptado de (Abreu *et al.*, 2013)).

Segundo o modelo proposto pelos autores, a diferença entre a temperatura da parede interna do tubo e a leitura apresentada pelo termopar pode ser descrita como

$$T_s(x) = T_{s,e}(x) - q(r_{t2} + r_{t1}) = T_{s,e}(x) - \frac{q}{2\pi k_t L} \ln\left(\frac{D + 2e}{D}\right) - qr_{t1} \quad 4.24$$

na qual o primeiro termo diz respeito à leitura do termopar na parede exterior, o segundo à condução na parede da tubagem e o terceiro corresponde à resistência de contacto identificada.

A calibração proposta residiu na determinação da resistência de contacto para todas as posições dos termopares, em cada um dos ensaios realizados com água destilada e fluido base. O cálculo

consistiu na utilização das equações 4.2 e 4.18, correspondentes ao cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção e do Número de Nusselt experimental, respetivamente, considerando os valores teóricos provenientes do modelo de Shah. Posteriormente, determinou-se a média da resistência térmica de contacto para cada posição dos termopares, e o respetivo desvio, como se indica na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores de resistência térmica de contacto correspondentes a cada termopar superfície e respetivo erro determinado com um intervalo de confiança de 95%, em unidades do Sistema Internacional.

Termopar	Resistência de contacto	Erro IC95%
TS1	-1,52E-03	5,52E-04
TS3	1,18E-02	8,95E-04
TS4	1,06E-02	8,79E-04
TS5	5,85E-03	1,09E-03
TS6	6,78E-03	1,26E-03
TS7	2,25E-03	1,42E-03
TS8	2,99E-03	1,42E-03
TS9	-1,01E-03	1,53E-03
TS10	-4,70E-03	1,60E-03
TS11	-4,32E-03	1,77E-03

Os valores da resistência de contacto foram utilizados para calcular os novos valores do número do coeficiente de transferência de calor por convecção e do número de Nusselt experimental, cuja nova nuvem de dados se pode visualizar na Figura 4.11. Deve referir-se que os gráficos apresentados e discutidos para a avaliação da repetibilidade dos ensaios contemplam as alterações apresentadas nesta secção.

Como se pode observar, a nova dispersão de dados experimentais apresenta maior consistência com o modelo teórico que rege o comportamento dos fluidos na transferência de calor por convecção sob as condições de ensaio impostas. As incertezas experimentais representadas pelas barras de erros foram novamente calculadas considerando a nova expressão para o cálculo da temperatura da parede interna da tubagem, não ultrapassando, uma vez mais, os 5% do valor experimental.

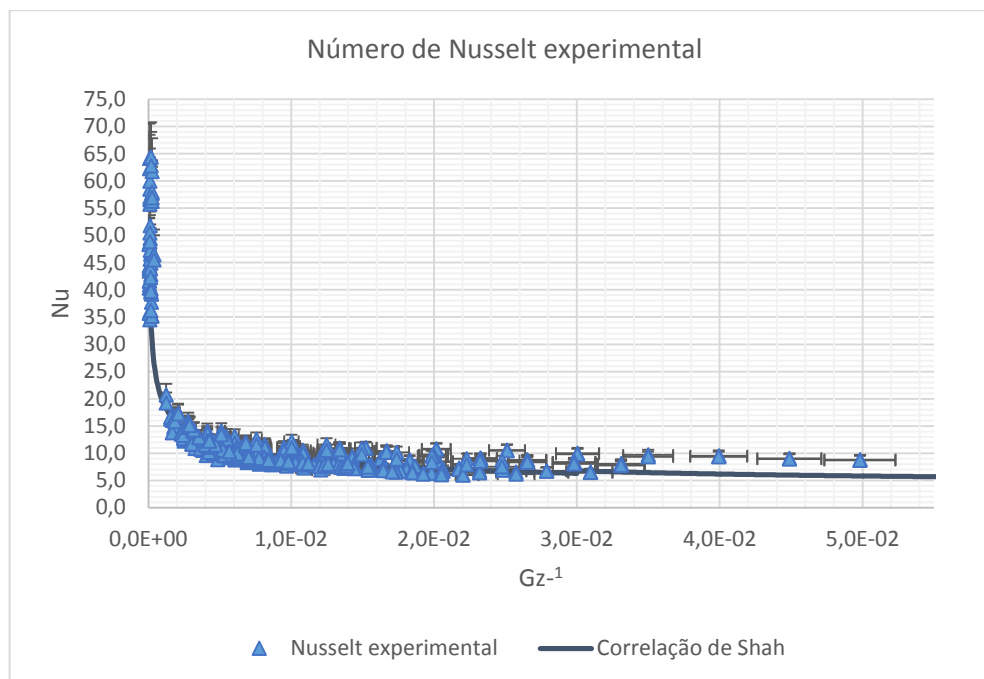


Figura 4.11 - Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com água destilada e fluido base, após o cálculo da resistência de contacto.

Verifica-se que, apesar da correção realizada à metodologia de cálculo, o intervalo experimental não contém por completo a curva correspondente à equação de Shah. No entanto, quando calculado o desvio percentual de cada ponto da dispersão ao modelo teórico, esta variação não excede os 10%, considerando-se verosímil para os efeitos desta investigação experimental.

4.2.3.3 BREVE DISCUSSÃO ACERCA DA EXATIDÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

A realização do presente trabalho experimental pressupõe uma metodologia que compreende um grande número de procedimentos e iterações que podem traduzir-se em elevadas incertezas experimentais e/ou desvios aos valores esperados teoricamente.

O conceito de exatidão está associado a ideia de proximidade do valor correto e, por conseguinte, a estimativa deste parâmetro exige que se conheça o valor correto da grandeza que está a ser medida. A identificação e tratamento de erros sistemáticos nem sempre é simples, pois exige a antecipação das possíveis fontes desta categoria de erros e a garantir que são inferiores à precisão requerida.

O procedimento utilizado para estimar os erros sistemáticos depende muito da natureza da experiência em questão. No trabalho experimental em curso, o objetivo visa a determinação de

uma grandeza desconhecida, que é o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos. Para inferir da correção do resultado procurou-se calibrar o dispositivo experimental e a metodologia inerente, recorrendo a substâncias de referência, como é o caso da água destilada e do fluido base, uma diluição de 30% de etilenoglicol em água destilada. A exatidão obtida com os procedimentos levados a cabo é considerada como sendo a exatidão da grandeza sob medição.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após ter sido estabelecida a metodologia a adotar na realização dos ensaios, e depois de averiguada a adequabilidade do equipamento experimental com a realização de ensaios preliminares, foram finalmente testados os nanofluidos produzidos. As condições estabelecidas para cada um dos ensaios realizados encontram-se listadas na Tabela 5.1, seguindo o DOE proposto na secção 3.1.

Tabela 5.1 – Conjunto de parâmetros em análise.

Nanofluido	Número de Reynolds	Temperatura à entrada da secção de testes
NF0,25%	1000	293,15
NF0,5%	1500	313,15
	2000	

Para cada conjunto de condições nanofluido-número de Reynolds-temperatura presentes na Tabela 5.1, foram realizados cinco ensaios para o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%) e dois ensaios para cada conjunto de condições experimentais com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), seguindo a metodologia adotada na secção 4.2.2, a fim de, uma vez mais, averiguar a repetibilidade dos resultados. Como foi já referido, os ensaios foram realizados considerando a temperatura do fluido igual à temperatura deste à entrada na secção de teste. No final de cada ensaio, as propriedades termofísicas dos nanofluidos foram corrigidas para os valores correspondentes à temperatura média do fluido. Consequentemente, o número de Reynolds real é diferente do estabelecido *a priori*. No entanto, verificou-se que a alteração é inferior a 5%. Como tal, os resultados serão apresentados considerando as condições impostas inicialmente, referidas na Tabela 5.1.

5.1 REPETIBILIDADE DOS RESULTADOS

A avaliação dos resultados para o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%) permitiu verificar que a maioria apresenta boa repetibilidade, pois os desvios à média apresentam um desvio percentual inferior a 10%, um valor que, dada a natureza do equipamento experimental e as correções necessárias à temperatura média, é tido como aceitável. No entanto, verificou-se que para os ensaios realizados a 293,15K e Reynolds 2000, alguns apresentavam desvios elevados, como se pode observar no gráfico da Figura 5.1.

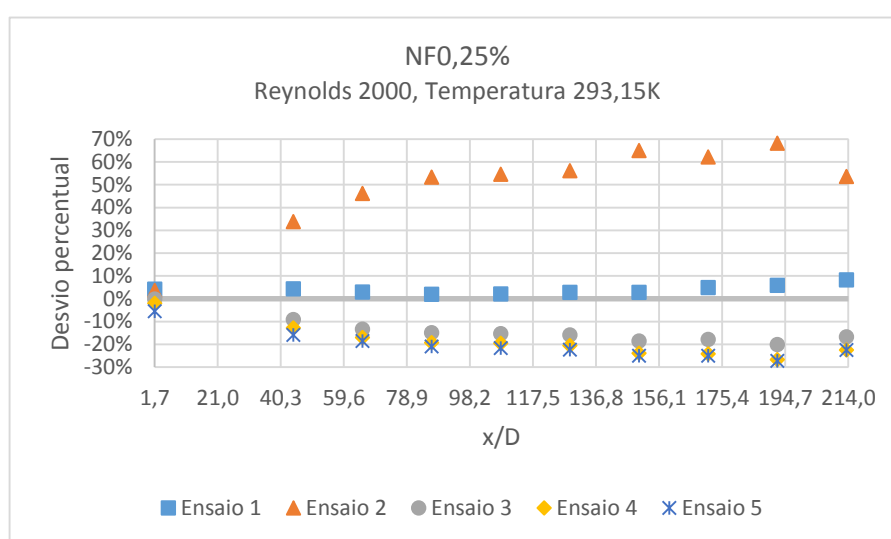


Figura 5.1 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

Face aos resultados apresentados, foram rejeitados os valores de dois dos ensaios realizados, correspondentes ao ensaio 1 e 2, conforme indicado na Figura 5.1. A Figura 5.2 apresenta a nova distribuição dos resultados face à média após a rejeição dos ensaios referidos. Verifica-se que a nova distribuição apresenta bons resultados, uma vez que os desvios são inferiores a 10%.

Nos ensaios realizados para o mesmo nanofluido a 313,15K verificou-se que, para um número de Reynolds de 1000, um dos ensaios (ensaio 1) apresentou um desvio à média de, aproximadamente, 10%, como se pode observar no gráfico da Figura 5.3.

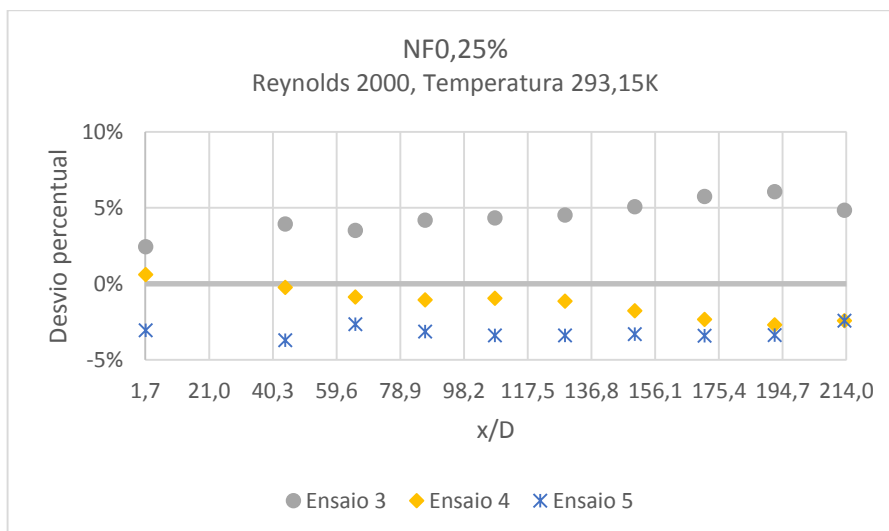


Figura 5.2– Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição dos ensaios com desvios superiores a 10%.

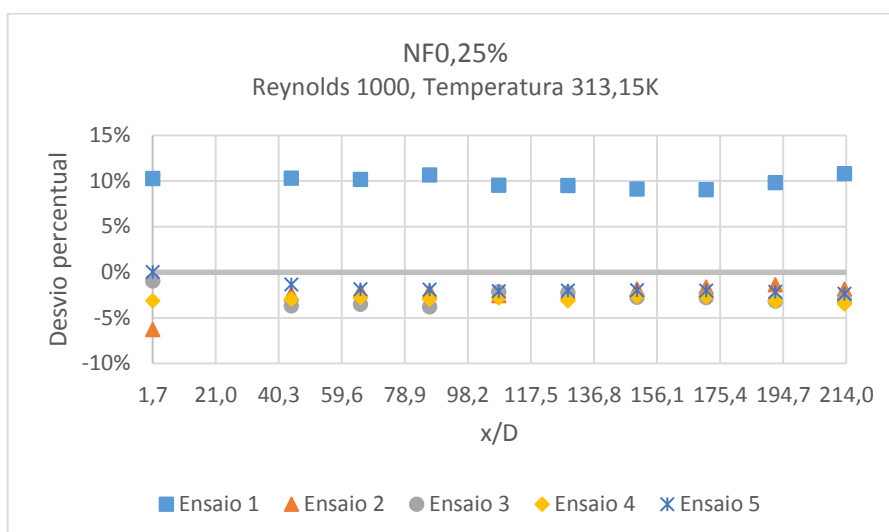


Figura 5.3 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

À semelhança da situação anterior, os dados referentes a este ensaio foram rejeitados. A nova distribuição dos resultados apresenta-se na Figura 5.4.

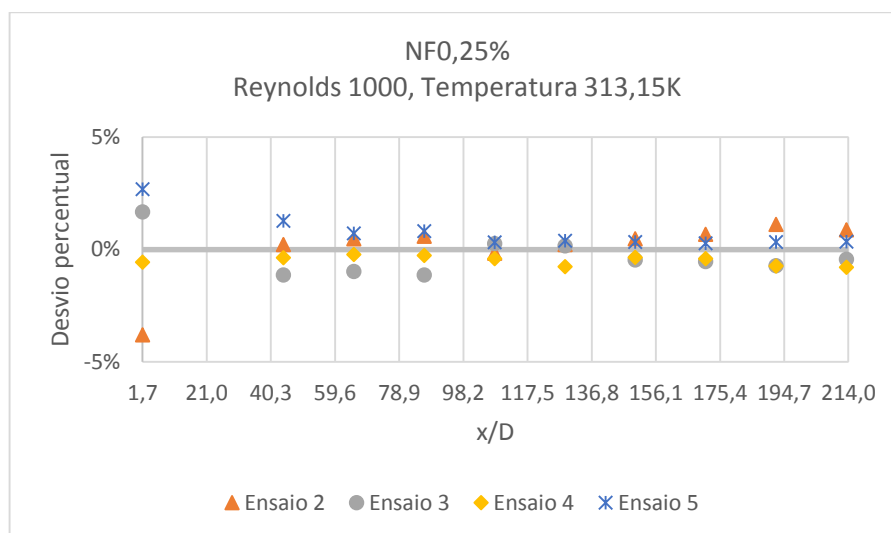


Figura 5.4 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição do ensaio com desvios superiores a 10%.

Quanto aos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NFO,5%), verificou-se que os ensaios realizados apresentaram desvios à média inferiores a 10%, pelo que se considerou existir boa repetibilidade. A informação referente à repetibilidade dos restantes ensaios pode ser consultada nos Anexos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Depois de averiguada a repetibilidade dos resultados, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção de acordo com a formulação matemática presente a secção 4.1.2. Os gráficos das Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 apresentam os resultados obtidos para o h dos nanofluidos em função do comprimento adimensional da tubagem (x/D) para os ensaios realizados a 293,15K. Os valores deste coeficiente respetivos aos ensaios realizados com fluido base, designado 70%AD+30%EG, sob as mesmas condições experimentais encontram-se igualmente representados. Para cada fluido, e para cada conjunto de condições experimentais, foi selecionado um dos ensaios realizados atendendo à análise de repetibilidade efetuada. As incertezas experimentais associadas aos resultados experimentais encontram-se também

representeadas e foram determinadas de acordo com a metodologia de cálculo apresentada na secção 4.1.3.

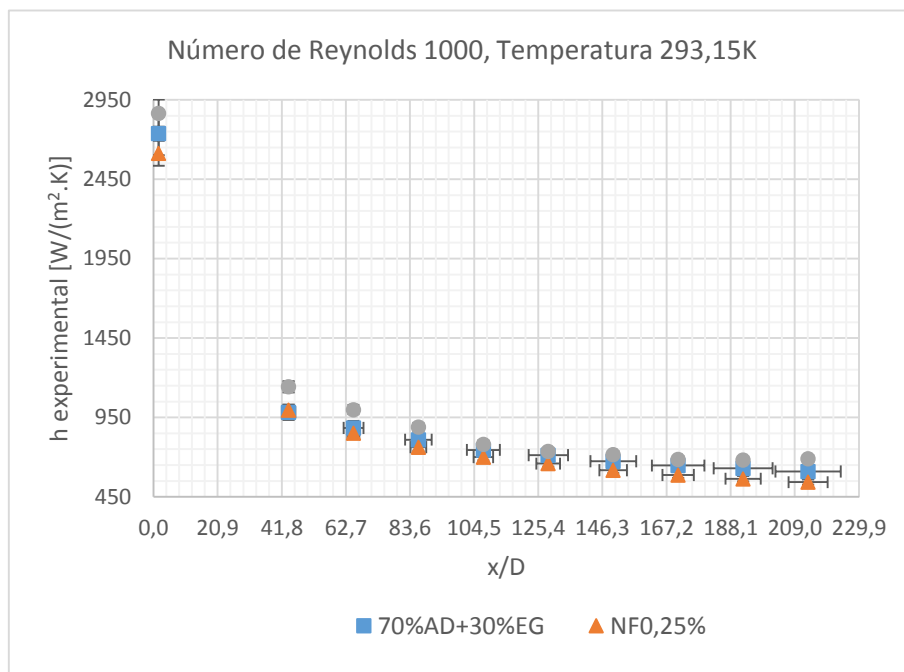


Figura 5.5 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

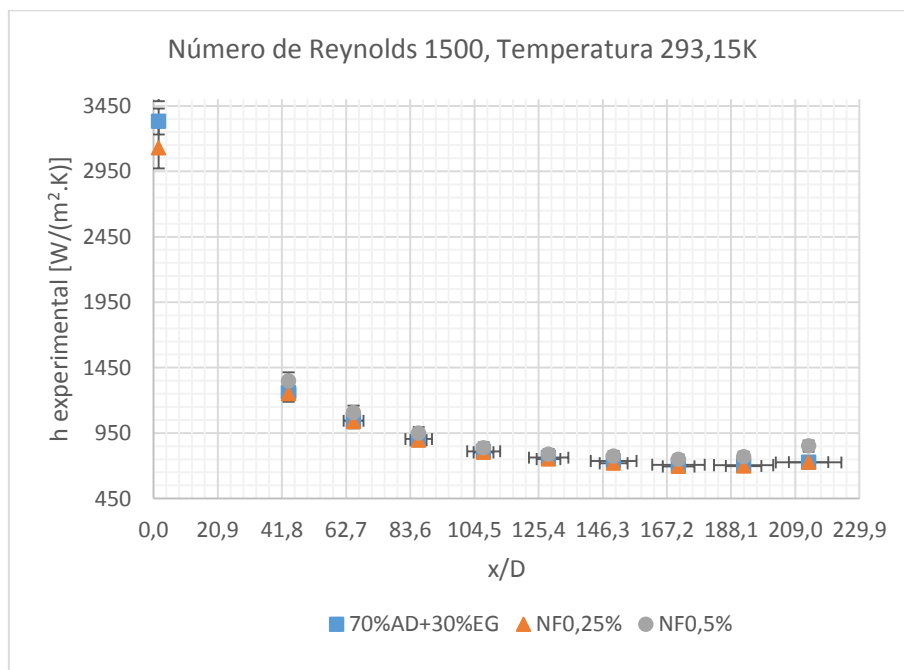


Figura 5.6 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500

(70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

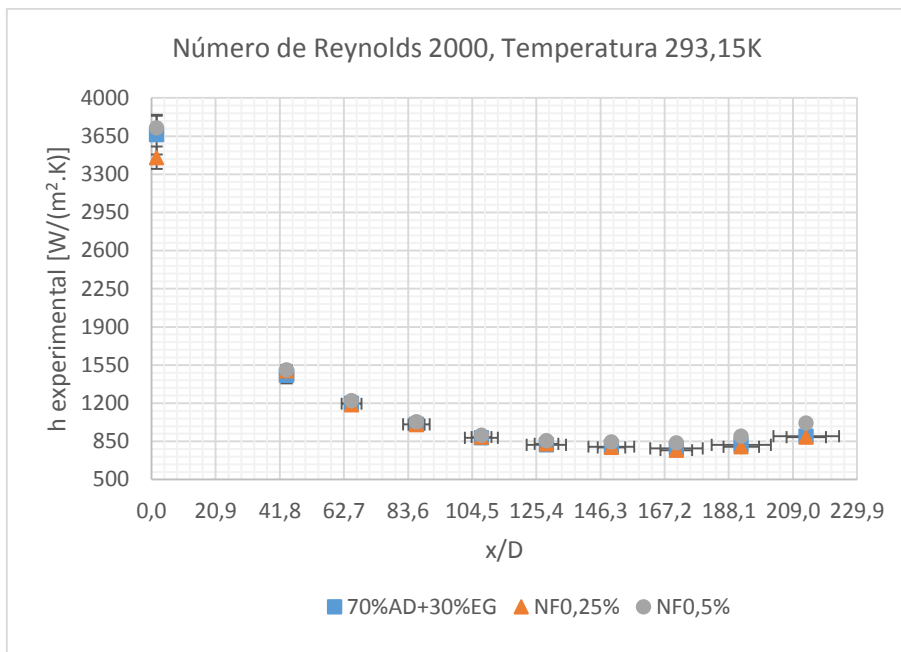


Figura 5.7 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

De igual forma, determinou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos NF0,25% e NF0,5% dos ensaios realizados a 313,15K, para cada número de Reynolds. Os gráficos das Figura 5.8, da Figura 5.9 e da Figura 5.11 apresentam os resultados obtidos para os nanofluidos e para o fluido base sob as mesmas condições experimentais, a 313,15K.

Ao observar os resultados obtidos, é possível verificar que os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido NF0,25% são, para a generalidade dos ensaios realizados, inferiores aos obtidos com o fluido base sob as mesmas condições, embora em alguns ensaios, os resultados se tenham verificado praticamente coincidentes, ao longo da secção de testes, independentemente do número de Reynolds e da temperatura do fluido no ensaio.

Quanto ao nanofluido NF0,5%, este apresentou valores superiores do coeficiente de transferência de calor por convecção quando comparado com o fluido base e com o nanofluido NF0,25%, à temperatura de 293,15K. No entanto, verificou-se um comportamento diferente para este nanofluido nos ensaios realizados a 313,15K, onde o coeficiente de transferência de calor por

convecção foi inferior ao do fluido base e ao do nanofluido NFO,25% quando sujeito às mesmas condições de ensaio, independentemente do número de Reynolds e da posição axial.

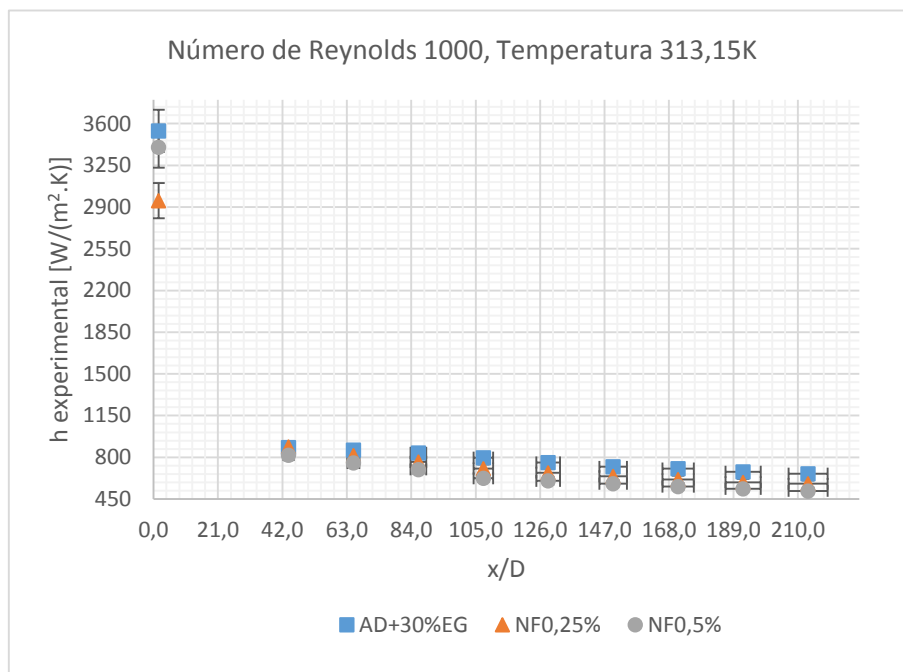


Figura 5.8 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base; NFO,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

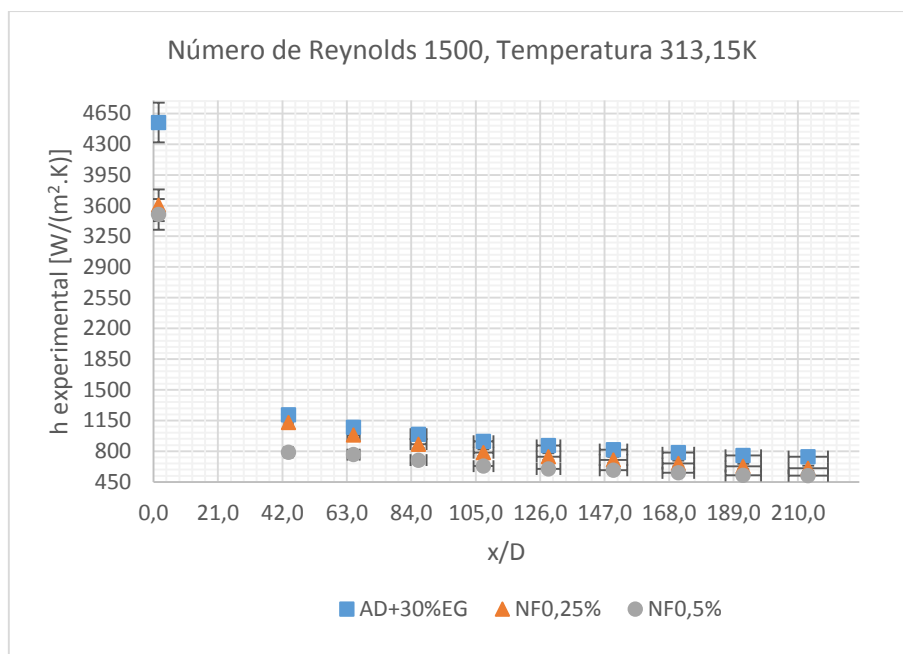


Figura 5.9 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500

(70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

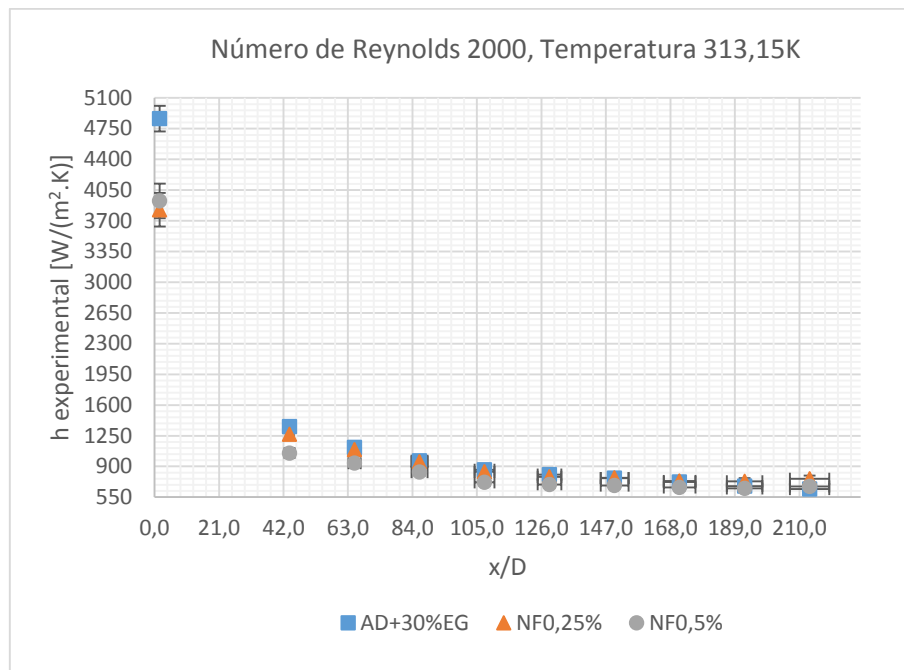


Figura 5.10 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Além da análise dos resultados já apresentada, foi também averiguada a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos com a temperatura, para o mesmo número de Reynolds, conforme se apresenta na Figura 5.11, na Figura 5.12, na Figura 5.13, na Figura 5.14, na Figura 5.15 e na Figura 5.16.

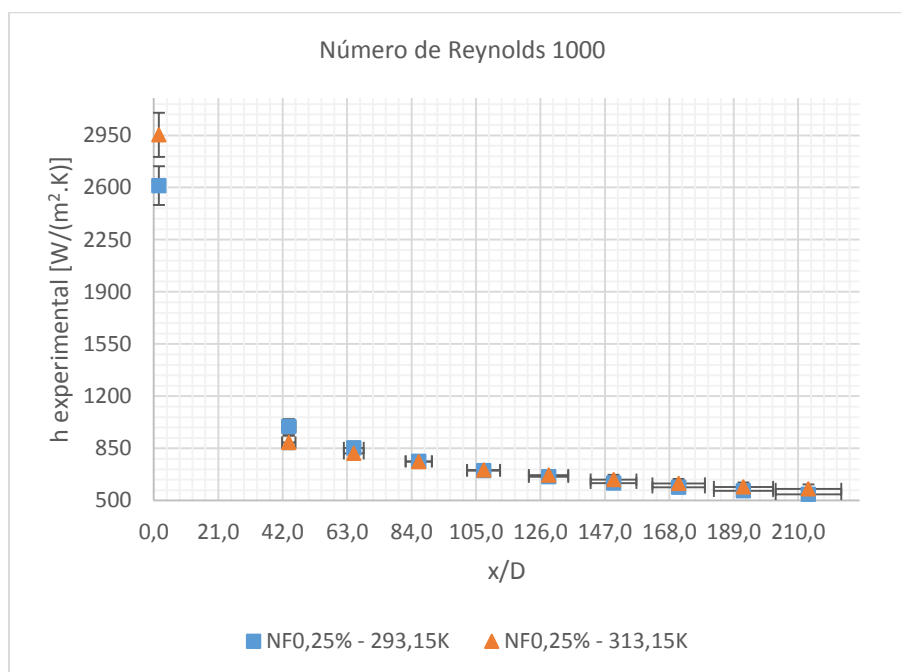


Figura 5.11 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1000, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

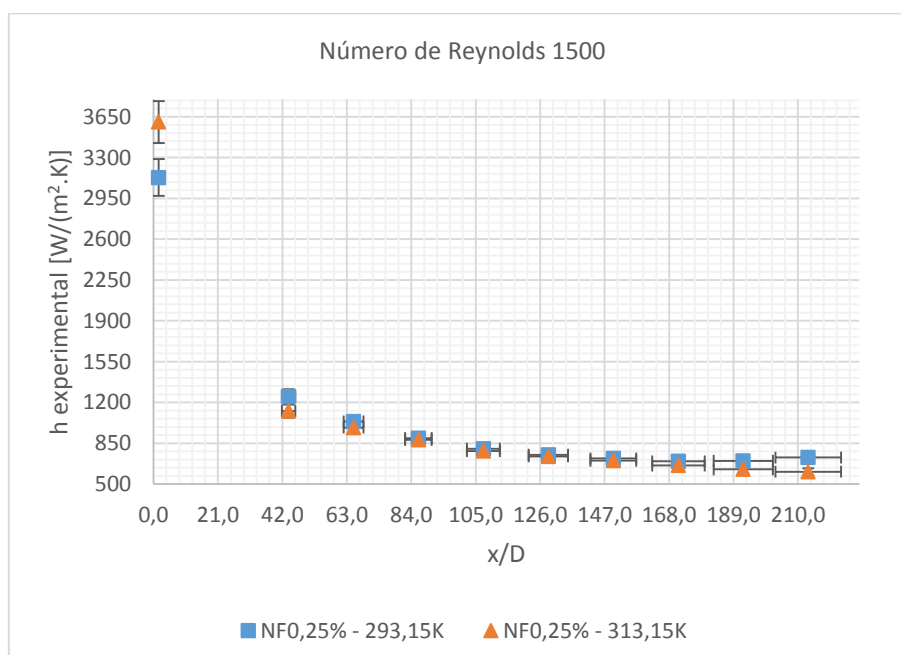


Figura 5.12 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1500, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

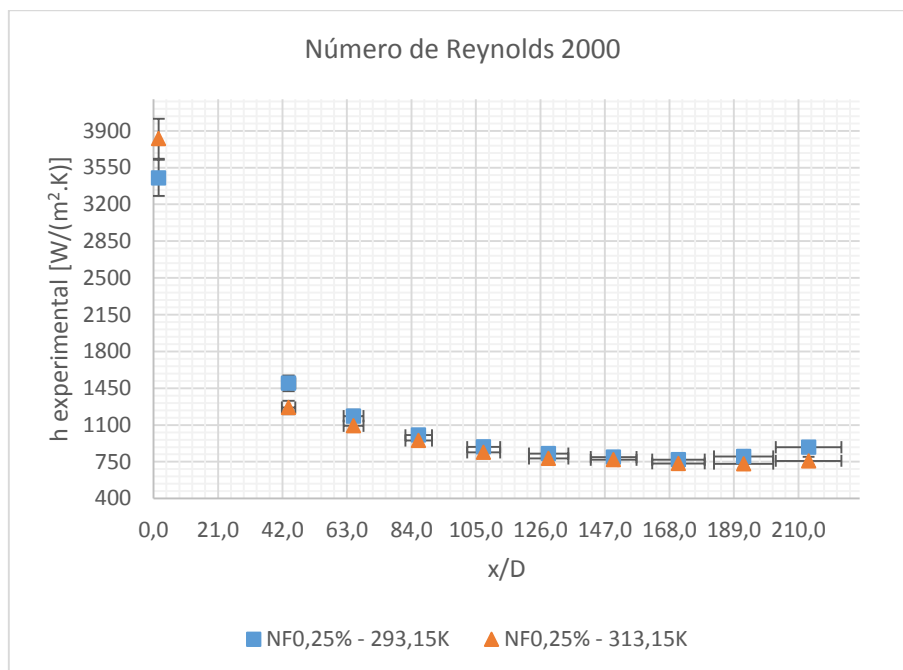


Figura 5.13 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 2000, para as duas temperaturas de teste (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

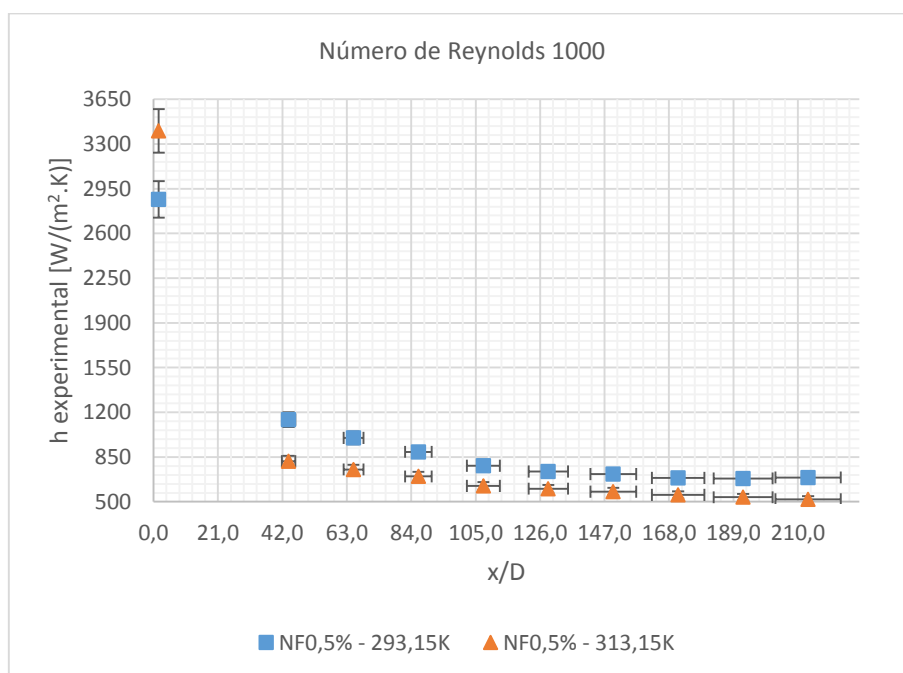


Figura 5.14 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1000, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

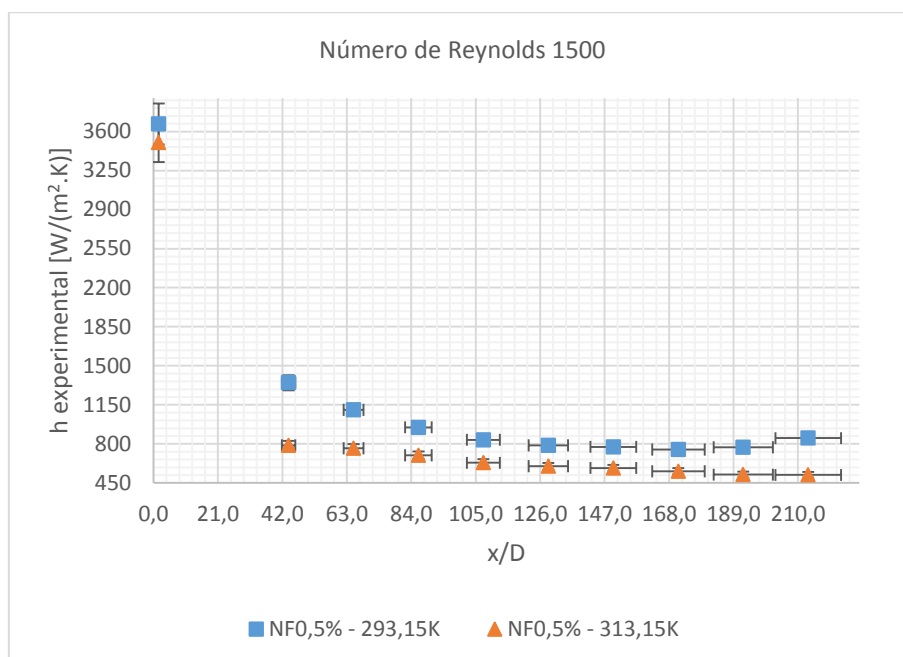


Figura 5.15 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 1500, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

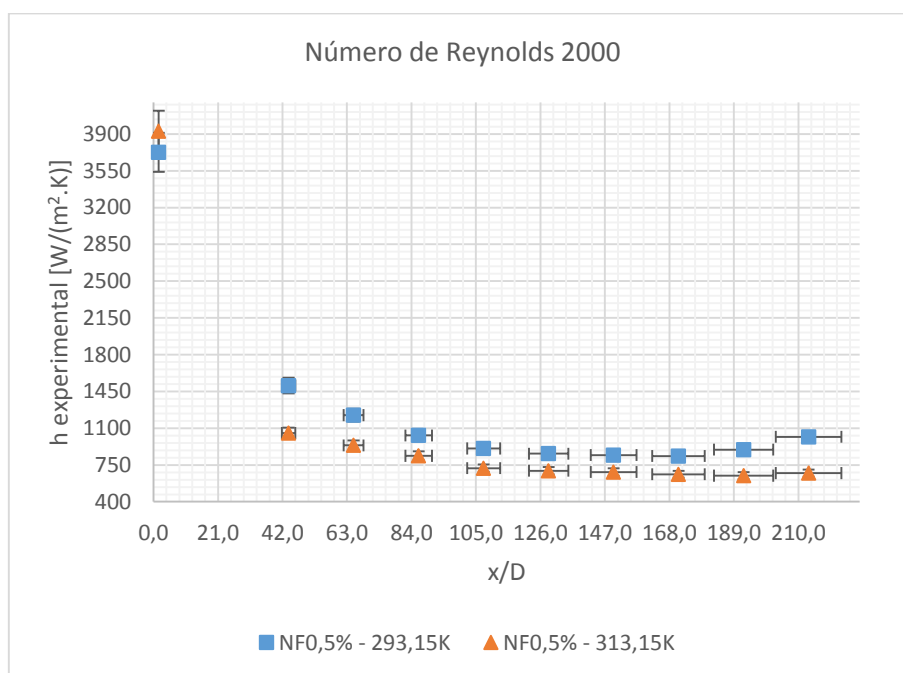


Figura 5.16 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com escoamentos com um número de Reynolds de 2000, para as duas temperaturas de teste (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Quando comparado o desempenho do nanofluido NF0,25% com a temperatura, para o mesmo número de Reynolds, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor é superior a 293,15K, e que este comportamento se repete para os vários números de Reynolds, com exceção da entrada da secção de testes, onde os valores são superiores a 313,15K. O mesmo se verificou para o nanofluido NF0,5%, tendo-se registado uma diferença superior entre o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção a 313,15K e 293,15K em cada posição axial, para cada um dos escoamentos analisados. Nestes ensaios, também se observou que o coeficiente de transferência de calor à entrada da secção de testes é superior para a temperatura de 313,15K, em escoamentos com um número de Reynolds de 1000 e 2000.

Por outro lado, os resultados dos nanofluidos podem ser avaliados do ponto de vista da temperatura de ensaio. Na Figura 5.17 e na Figura 5.18 pode visualizar-se os resultados dos ensaios realizados com o nanofluido NF0,25% a 293,15K e 313,15K, e na Figura 5.19e na Figura 5.20, os resultados correspondentes ao nanofluido NF0,5% para as respetivas temperaturas, bem como para os diferentes números de Reynolds testados.

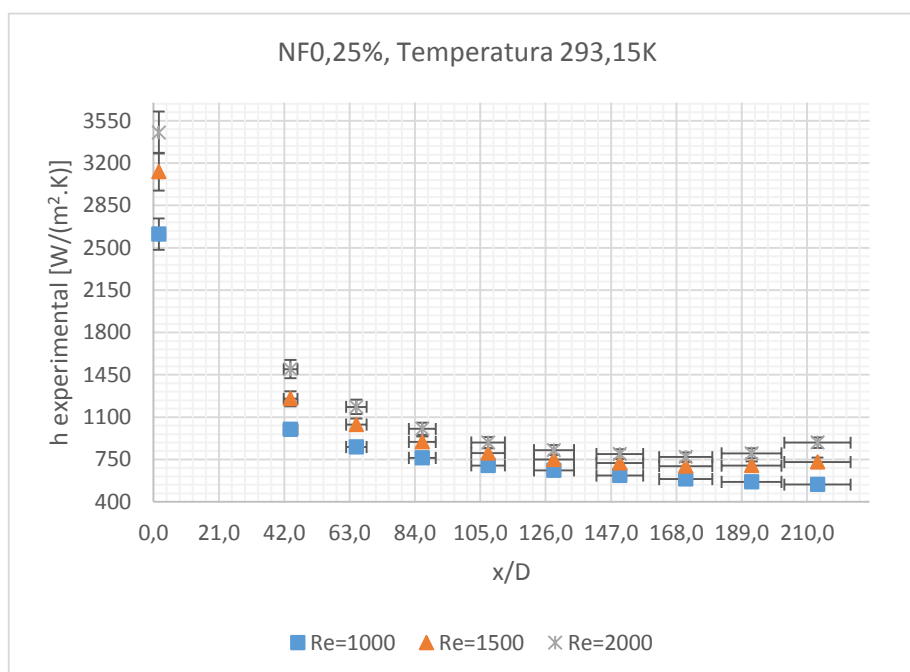


Figura 5.17 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

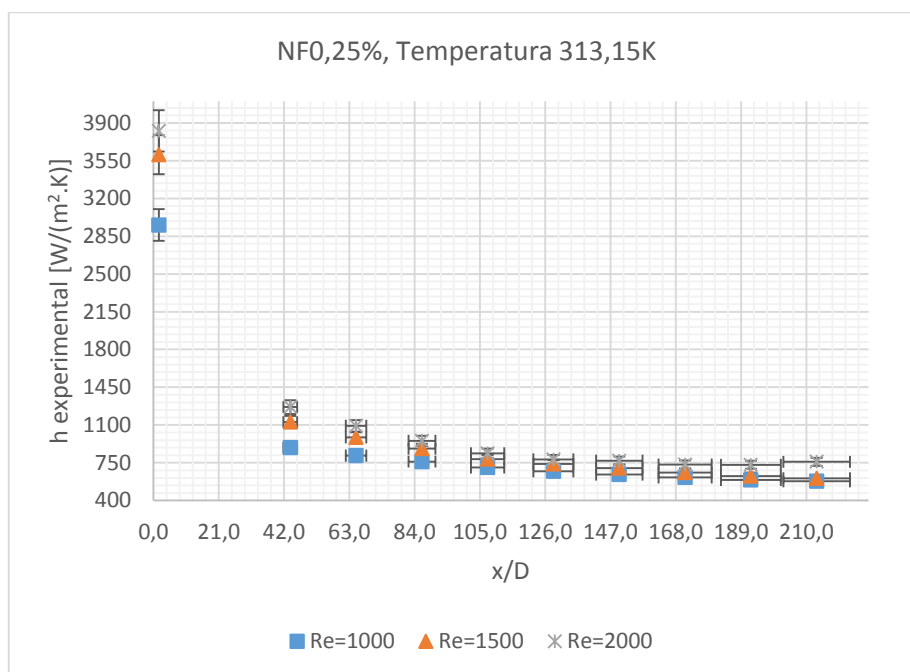


Figura 5.18 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

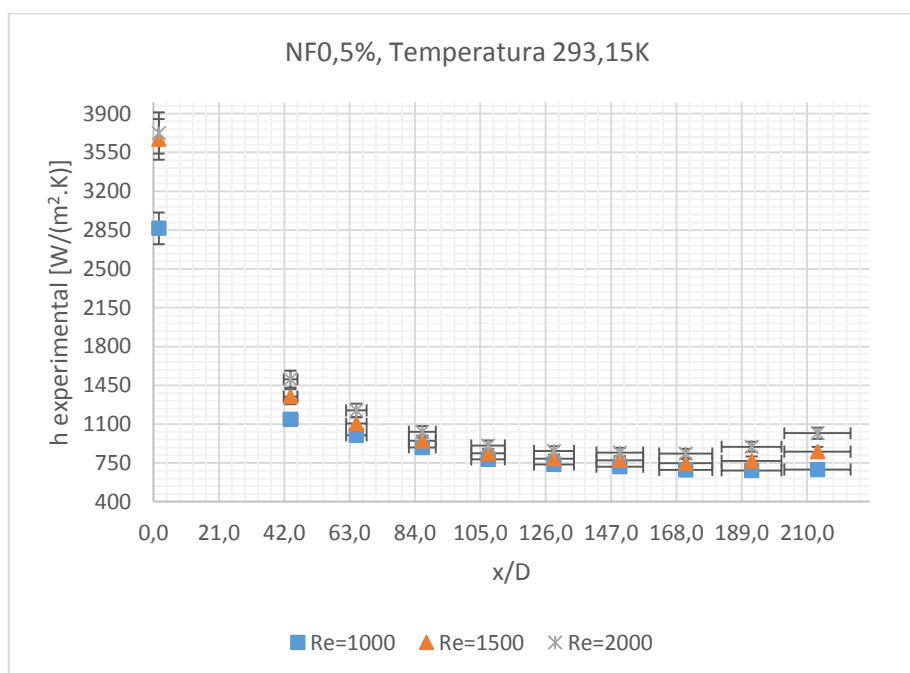


Figura 5.19 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

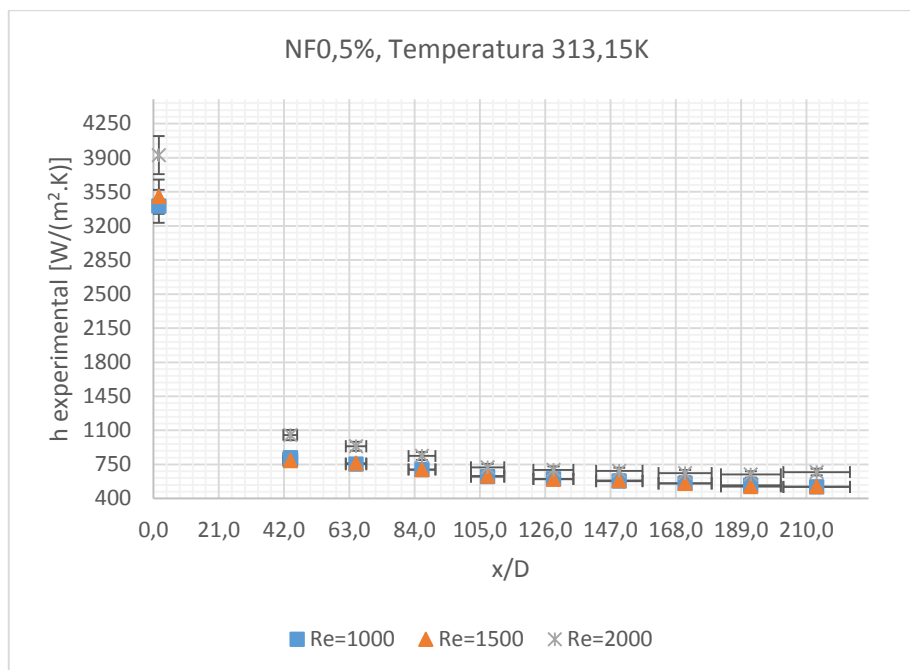


Figura 5.20 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K, para os diferentes números de Reynolds testados (NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Para as duas temperaturas de ensaio consideradas, 293,15K e 313,15K, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido aumenta com o número de Reynolds, para todas as posições ao longo da secção de testes, com a exceção do nanofluido NF0,5% a 313,15K, o qual apresenta um coeficiente de transferência de calor por convecção para Reynolds de 1500 coincidente com o registado para um número de Reynolds de 1000. Deve mencionar-se que este não é de todo o resultado esperado, no entanto, a explicação para este facto não é óbvia uma vez que não existem dados na literatura que permitam comparações diretas com os resultados obtidos. Estar-se-ia à espera que o efeito da temperatura fosse consistente com o que foi observado para o nanofluido testado com menores concentrações, mas na verdade pouco se sabe sobre o assunto, sendo algo que necessita de um esclarecimento mais aprofundado.

5.3 QUANTIFICAÇÃO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

5.3.1 VARIAÇÃO RELATIVA FACE AO FLUIDO BASE

Apesar de se ter verificado na secção anterior que, de um modo geral, o desempenho do nanofluido com 0,25% de MWCNT é inferior ao do fluido base para as condições de ensaio estudadas, o nanofluido com a concentração de 0,5% de MWCNT apresentou valores do coeficiente de transferência de calor por convecção superiores ao fluido base a 293,15K mas inferiores a temperaturas de 313,15K, quer em relação ao fluido base, quer face ao nanofluido NF0,25%. Deste modo, realizou-se uma nova avaliação aos resultados, a fim de quantificar as variações observadas.

A nova análise teve como objetivo quantificar a variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos ($\Delta h_{\%}$) face a um valor de referência, para cada conjunto de condições de ensaios analisados, em cada posição axial. Esta variação percentual foi calculada em cada situação como

$$\Delta h_{\%} = \frac{h_{i,x} - h_{r,x}}{h_{r,x}} \times 100$$

em que $h_{i,x}$ é valor do coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido em análise i na posição axial x , $h_{r,x}$ é o respetivo valor do coeficiente para o fluido de referência.

Os gráficos da Figura 5.21, da Figura 5.22 e da Figura 5.23 apresentam os desvios percentuais registados para o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido NF0,25% face ao fluido base (fluido de referência), para cada ensaio realizado a 293,15K, ao longo da secção de testes. Deve-se referir que, embora os resultados digam respeito a dados discretos, optou-se por uma representação com linhas suaves, apenas como forma de evidenciar a variação do comportamento do fluido na transferência de calor face ao fluido de referência segundo a distância axial.

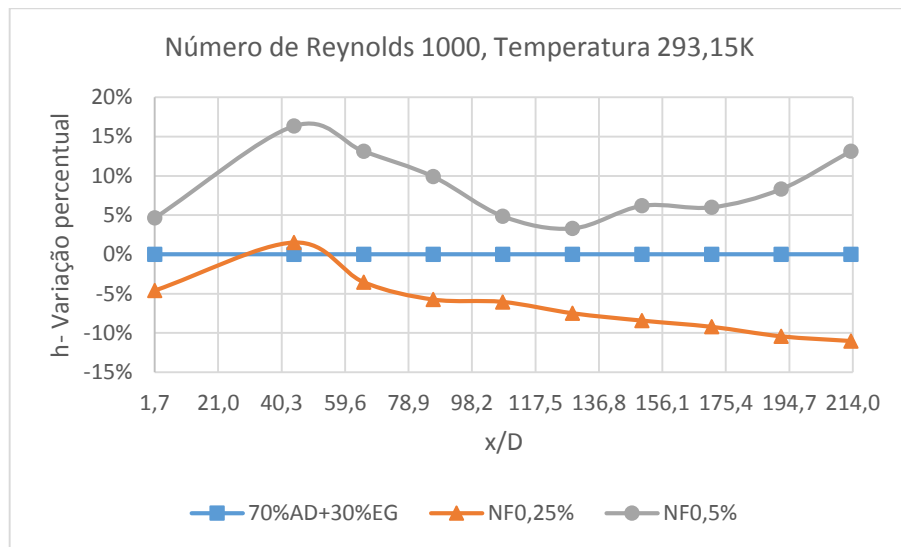


Figura 5.21 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

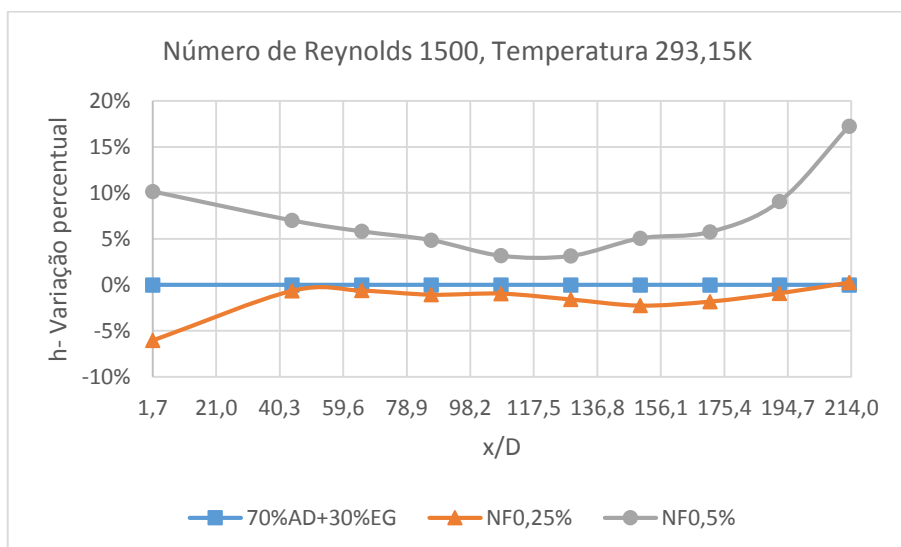


Figura 5.22 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

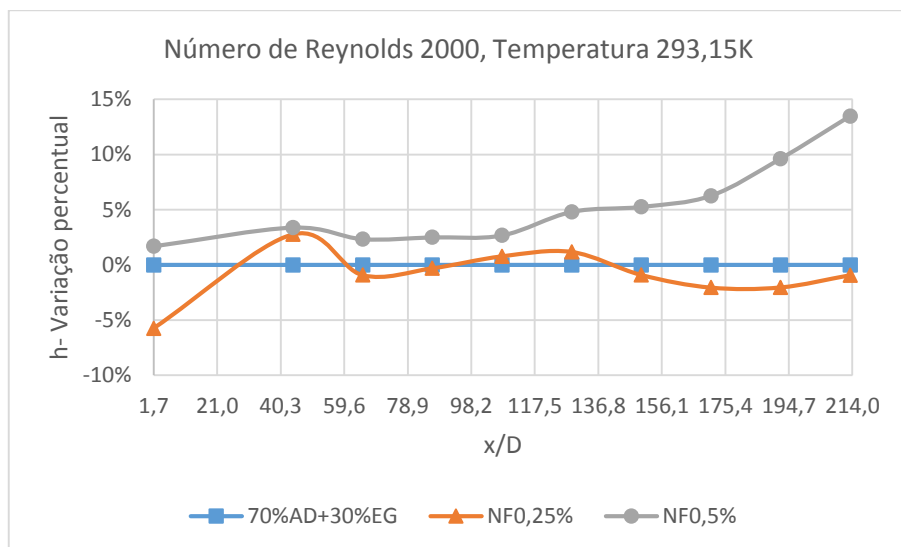


Figura 5.23 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, o maior desvio em relação ao fluido base registou-se para o menor número de Reynolds, de 1000. Verificou-se ainda que este desvio aumenta com a distância axial. Para este número de Reynolds, o nanofluido apresentou um coeficiente cerca de 10% inferior ao do fluido base no final da secção de teste. Para os ensaios realizados com um número de Reynolds de 2000, os resultados apresentaram oscilações entre desvios positivos e negativos em relação ao fluido base embora estes não cheguem aos 5%, quer positivos quer negativos, à exceção do primeiro termopar. Para os ensaios com um número de Reynolds de 1500 e 2000, o maior desvio percentual registou-se para o primeiro termopar, posição para a qual se verifica o maior valor de h. Já para o número de Reynolds de 1500, o desvio face ao fluido base diminuiu em relação ao Reynolds 1000, sendo menor que 5% ao longo de todo o tubo, com exceção do primeiro termopar.

Contrariamente ao nanofluido com uma concentração volúmica de 0,25% de MWCNT, o nanofluido NF0,5% apresentou um coeficiente de transferência de calor por convecção superior ao fluido base que, apesar de variar com a posição axial, se situou em valores na ordem dos 5%, aumentando no final do ensaio para valores acima dos 10%. Verificou-se ainda que esta melhoria crescente no final da secção de testes aumentou ligeiramente com o número de Reynolds.

Face aos resultados registados para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K, parece um valor de concentração de MWCNT, situado entre 0,25% e 0,5%, a partir do qual o coeficiente de

transferência de calor por convecção é superior ao do fluido base sob as mesmas condições de ensaio.

De seguida, analisaram-se os ensaios à temperatura de 313,15K, como se apresenta na Figura 5.24, na Figura 5.25 e na Figura 5.26, onde o fluido de referência é, uma vez mais, a diluição de 30% de etilenoglicol em água destilada.

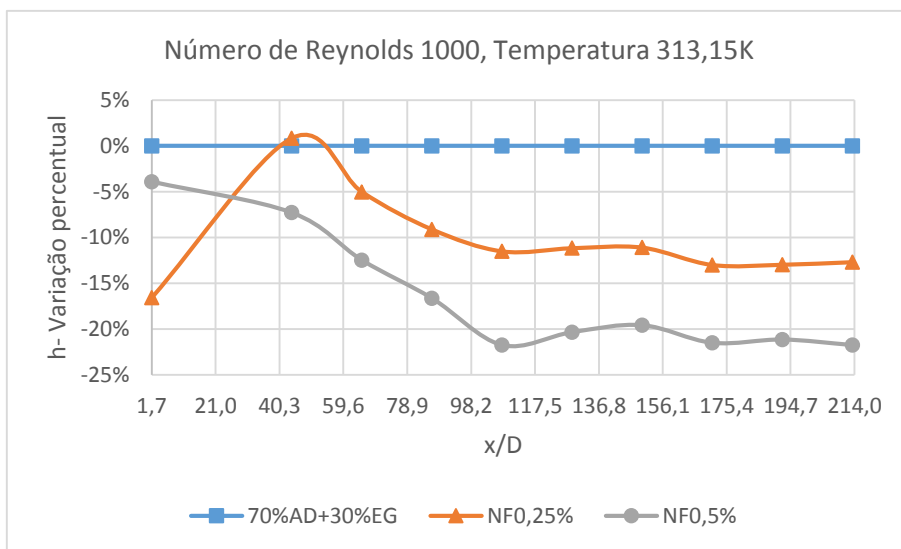


Figura 5.24 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NFO,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

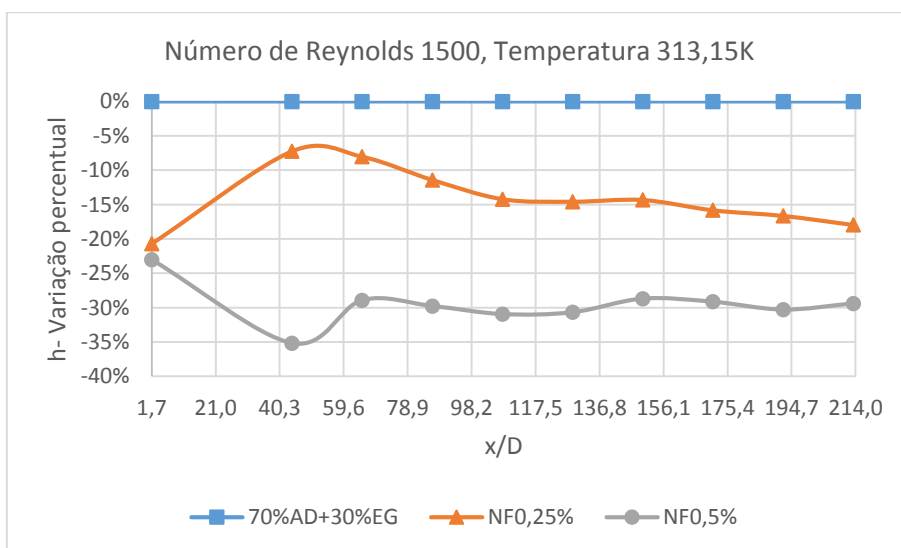


Figura 5.25 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de

Reynolds de 1500 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

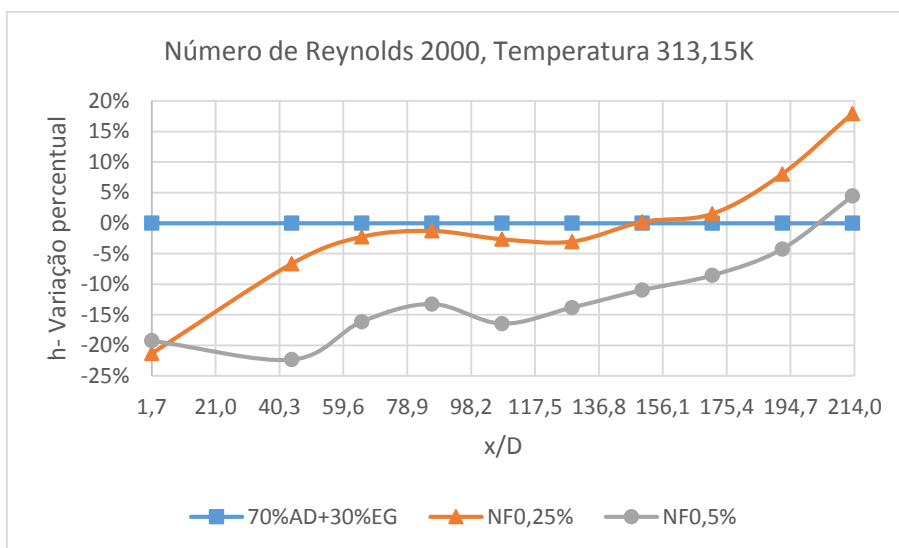


Figura 5.26 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Em oposição ao que se havia observado para os ensaios realizados a 293,15K, o nanofluido NF0,5% apresentou um coeficiente de transferência de calor por convecção inferior ao do fluido base e também inferior ao do nanofluido com concentração de 0,25% de MWCNT. A diminuição percentual verificada para o NF0,5% atingiu um patamar de 20% para um número de Reynolds de 1000 e 30% para 1500. No entanto, para o número de Reynolds de 2000 a diminuição máxima registada foi de 20%, mas esta diminuiu com o aumento da posição axial e, no final da secção de ensaios, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção supera o do fluido base em 5%. Quanto ao nanofluido NF0,25%, este apresenta um comportamento semelhante ao NF0,5% com o aumento da distância axial, para cada número de Reynolds estudado. No entanto, a variação do coeficiente de transferência de calor em relação ao fluido base, embora negativa para Reynolds de 1000 e 1500, é superior à do nanofluido com 0,5% de MWCNT, e de, aproximadamente, 15%. Já para o número de Reynolds de 2000, o desvio percentual face ao fluido base é mínimo, com exceção à entrada da secção, apresentando um coeficiente 20% para a distância axial correspondente à posição do último termopar da secção de ensaios.

5.3.2 VARIAÇÃO RELATIVA À TEMPERATURA

De seguida realizou-se uma avaliação do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos face à temperatura, para cada número de Reynolds, tendo sido utilizado o ensaio realizado a 293,15K como referência. As Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 apresentam os resultados referentes ao nanofluido NF0,25%.

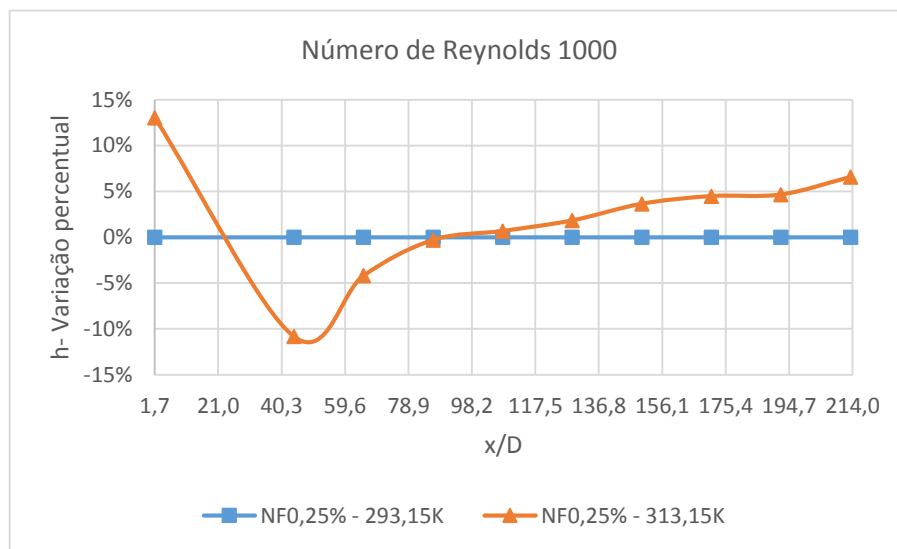


Figura 5.27 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

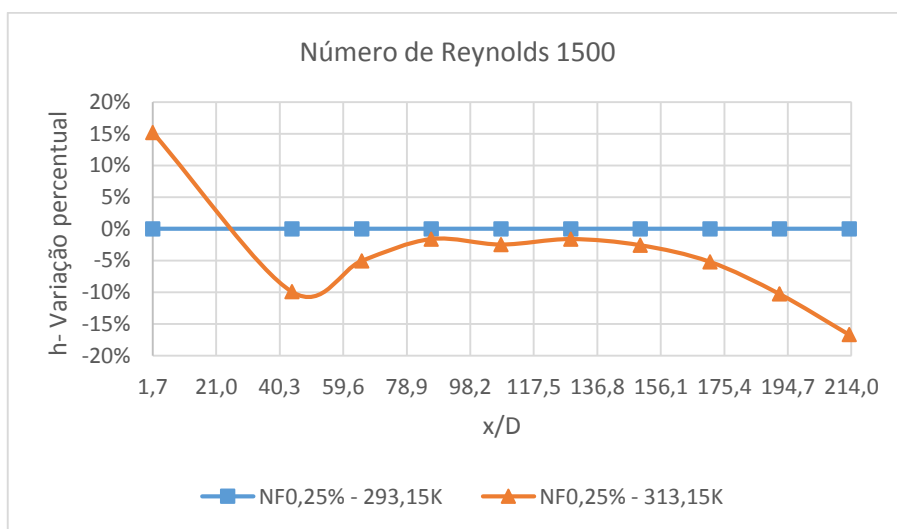


Figura 5.28 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

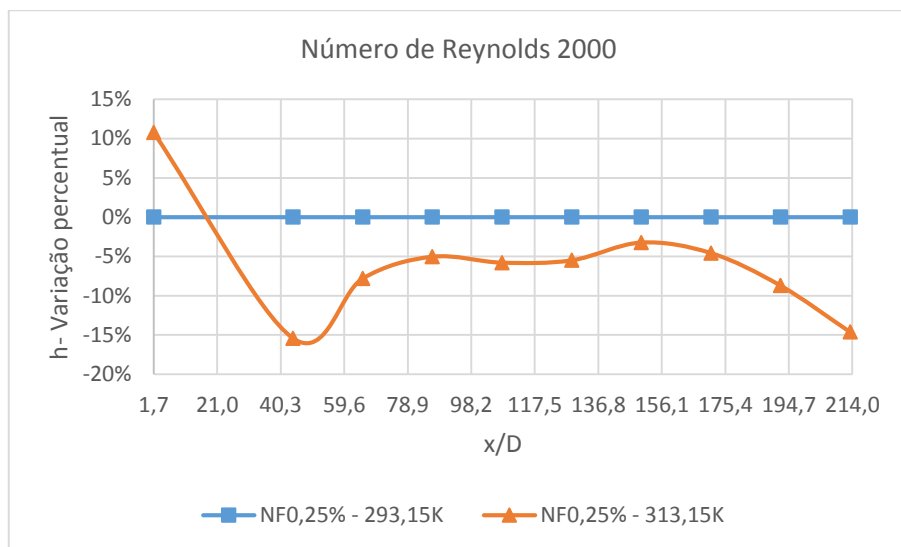


Figura 5.29 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

Através dos resultados apresentados, é possível constatar que o coeficiente de transferência de calor por convecção é superior para o nanofluido com 0,25% de MWCNT quando a temperatura de ensaio é 293,15K. No entanto, para o escoamento com um número de Reynolds de 1000, o valor do coeficiente para o teste com uma temperatura de 313,15K supera o registado para o ensaio a 293,15K, para distâncias axiais superiores a 27,5% da secção de teste, ou seja, a partir de uma distância axial $x/D=65,17$. Por outro lado, verificou-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido NF0,25% apresentou um aumento superior a 10% para os ensaios a 313,15K face aos levados a cabo a 293,15K à entrada da tubagem, independentemente do número de Reynolds. A mesma análise foi realizada para o nanofluido NF0,5% e apresenta-se nos gráficos da Figura 5.30, da Figura 5.31 e da Figura 5.32.

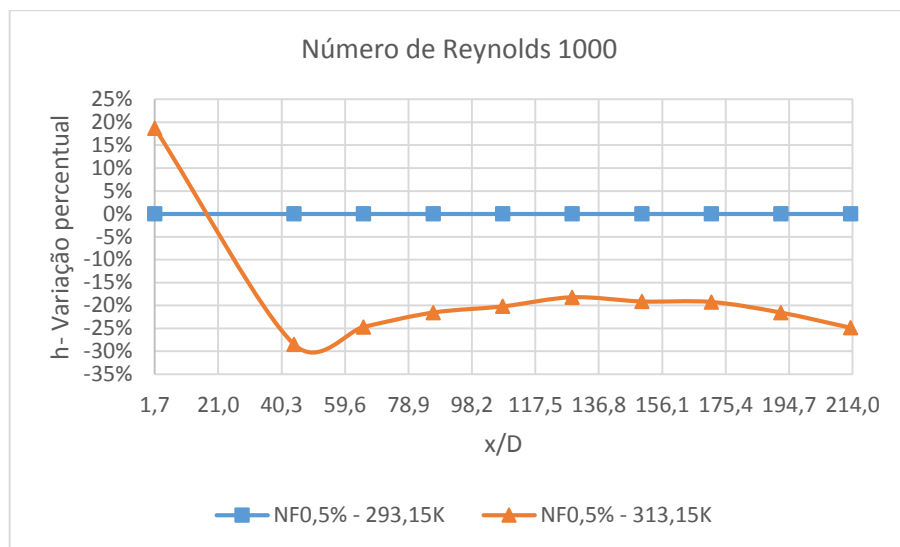


Figura 5.30 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

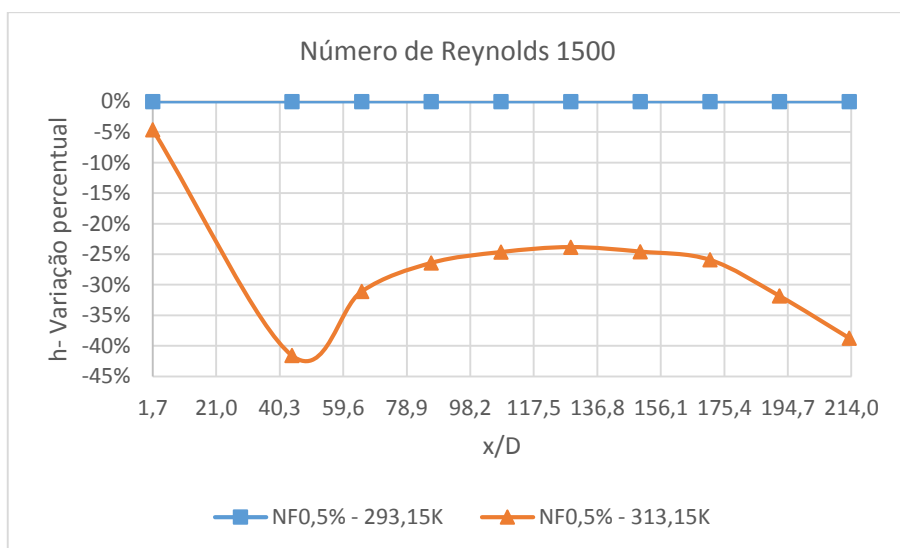


Figura 5.31 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

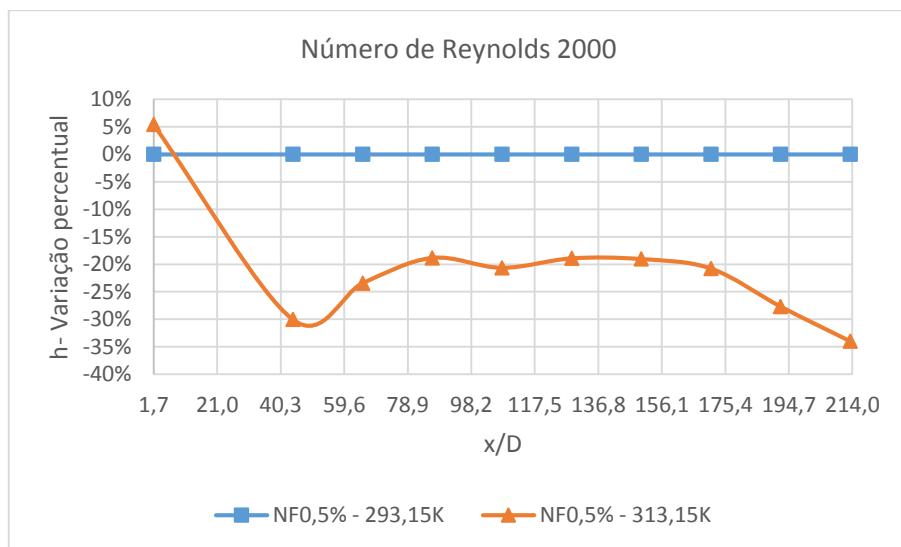


Figura 5.32 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Como se pode observar, o coeficiente de transferência de calor por convecção do nanofluido NF0,5% à temperatura de 313,15K foi, aproximadamente, 20% inferior ao registado a 293,15K, para um Reynolds de 1000 e 2000, e 25% inferior para um Reynolds de 1500. As variações registadas foram mais significativas do que para o nanofluido com 0,25% de MWCNT. Além do desvio percentual ser superior, observa-se a existência de uma diminuição abrupta do coeficiente de transferência de calor a seguir à entrada da secção, numa posição correspondente a cerca de 10% da secção de ensaios. Apesar de a variação atingir um patamar para todos os números de Reynolds, observou-se ainda um aumento com a distância axial da tubagem que chegou aos 35% para a posição axial do último termopar para números de Reynolds de 1000 e 2000, e de 40% para um Reynolds de 1500. A mesma avaliação foi realizada para o fluido base, e encontra-se representada pelos gráficos da Figura 5.33, da Figura 5.34 e da Figura 5.35.

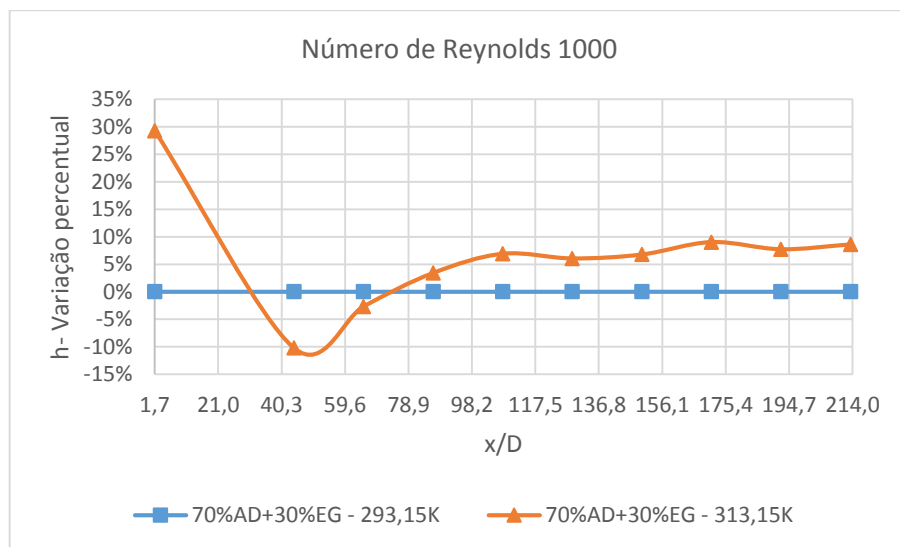


Figura 5.33 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).

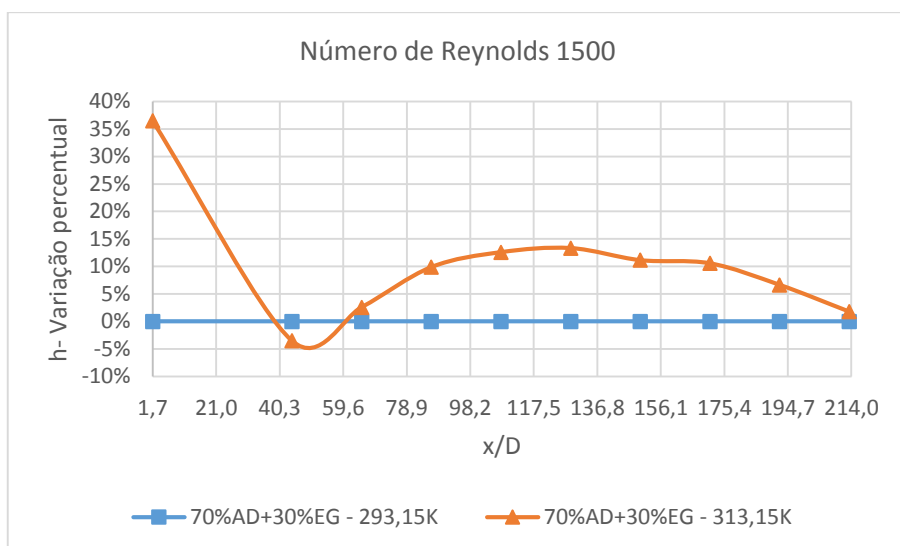


Figura 5.34 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 1500 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).

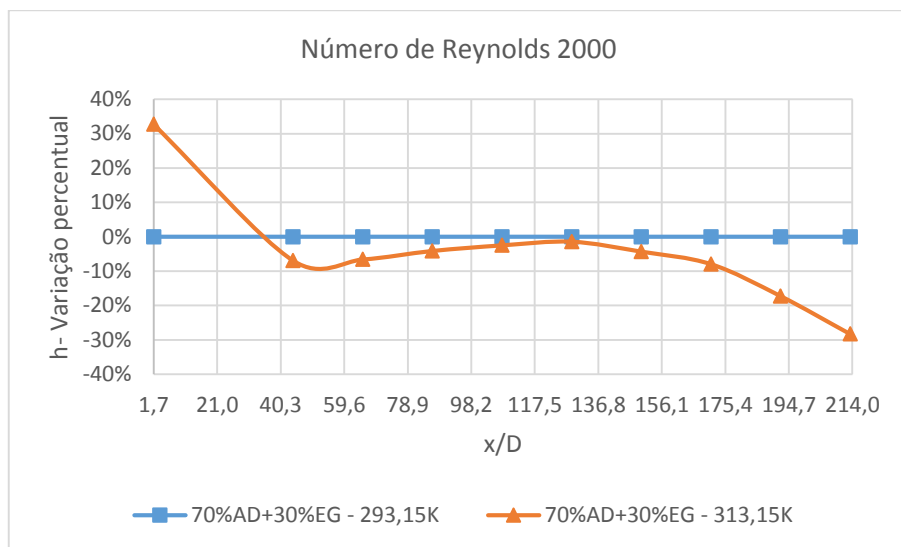


Figura 5.35 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um escoamento com um número de Reynolds de 2000 (Ensaio a 293,15K como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).

Contrariamente ao verificado para os ensaios realizados com o nanofluido NF0,25%, o fluido base apresenta um coeficiente de transferência de calor por convecção superior para a temperatura de 313,15K, para um número de Reynolds de 1000 e 1500. Tal como o nanofluido NF0,25%, o aumento percentual mais significativo acontece à entrada da tubagem para diferentes números de Reynolds, atingindo valores superiores a 30% face a ensaios a temperatura de 293,15K. Para Reynolds de 1000 e 1500 observa-se uma diminuição a partir da entrada da tubagem e, novamente, uma melhoria do desempenho do nanofluido do nanofluido NF0,25% a 313,15K a partir da posição $x/D=44$, aproximadamente 18,6% do comprimento total da secção, registando-se uma melhoria de cerca de 10% a partir deste ponto em relação aos ensaios a 293,15K.

No entanto, o fluido base apresenta um comportamento diferente para o escoamento com um número de Reynolds de 2000, com um coeficiente de transferência de calor por convecção a 313,15K inferior ao do ensaio 293,15K. Esta variação face ao comportamento registado para os números de Reynolds de 1000 e 1500 faz questionar se algo aconteceu para esta alteração.

5.3.3 VARIAÇÃO RELATIVA AO NÚMERO DE REYNOLDS

Posteriormente, averiguou-se a variação do h dos nanofluidos com o número de Reynolds, para cada uma das temperaturas de teste. Nesta análise, o ensaio tido como referência foi o ensaio do respetivo nanofluido com um número de Reynolds de 1000. A Figura 5.36 e a Figura 5.37

apresentam a variação percentual do h do nanofluido NF0,25% em função dos diferentes números de Reynolds, ao longo do tubo, para cada uma das temperaturas.

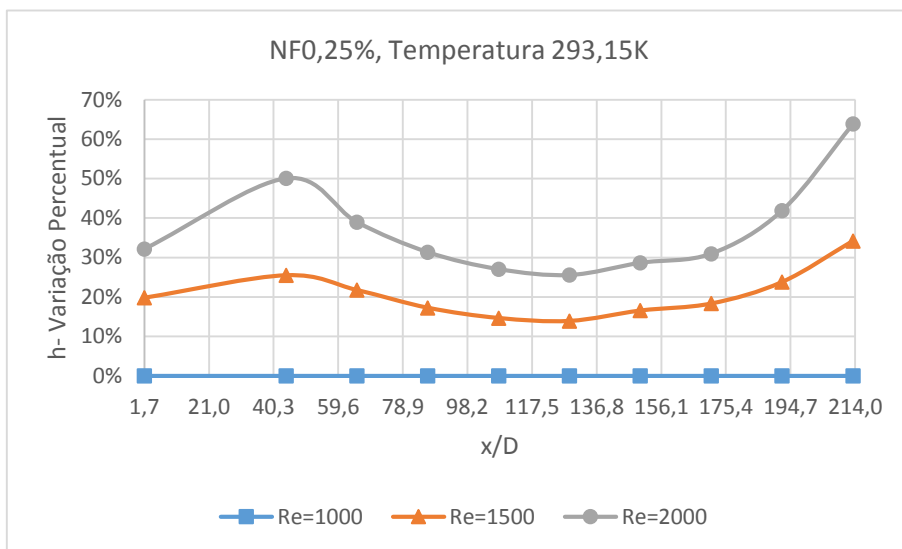


Figura 5.36 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

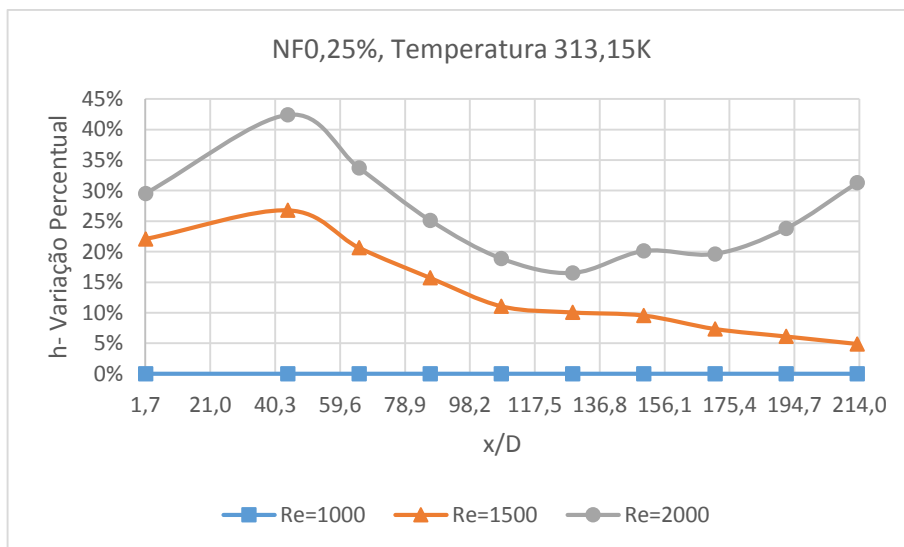


Figura 5.37 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

Face aos resultados apresentados, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção é tanto maior quanto mais elevado for o número de Reynolds, tal como é sugerido pela literatura. Segundo a Figura 5.36, o h é 10 a 20% superior para um Reynolds de 1500 face ao registado para um número de Reynolds e uma temperatura de 293,15K, enquanto que o aumento

é de 30 a 70% para o Reynolds de 2000. Verifica-se um comportamento semelhante para os ensaios realizados a 313,15K, embora se registre um aumento superior a 20% para um número de Reynolds de 1500 para a posição do termopar nº11, correspondente a 90,1% da secção de testes.

O nanofluido NF0,5% foi sujeito a uma avaliação semelhante, conforme se apresenta na Figura 5.38 e na Figura 5.39.

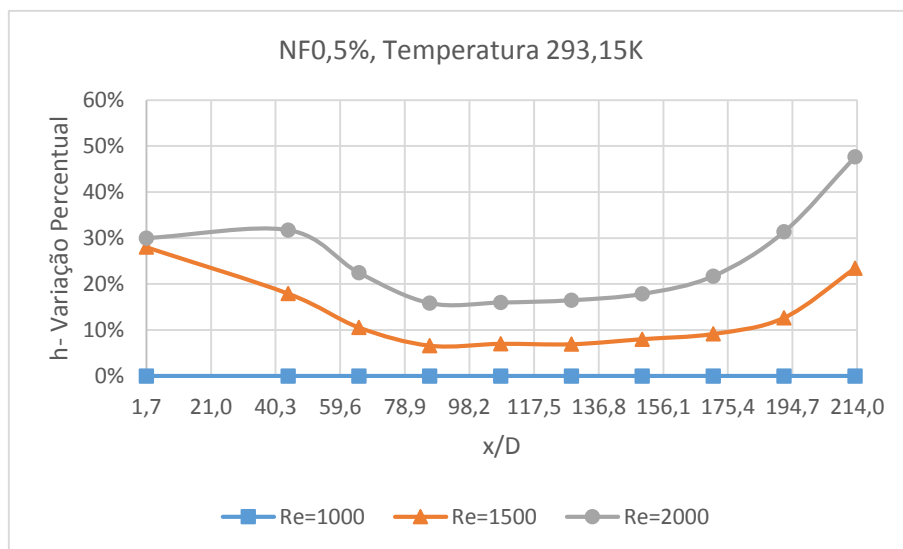


Figura 5.38 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

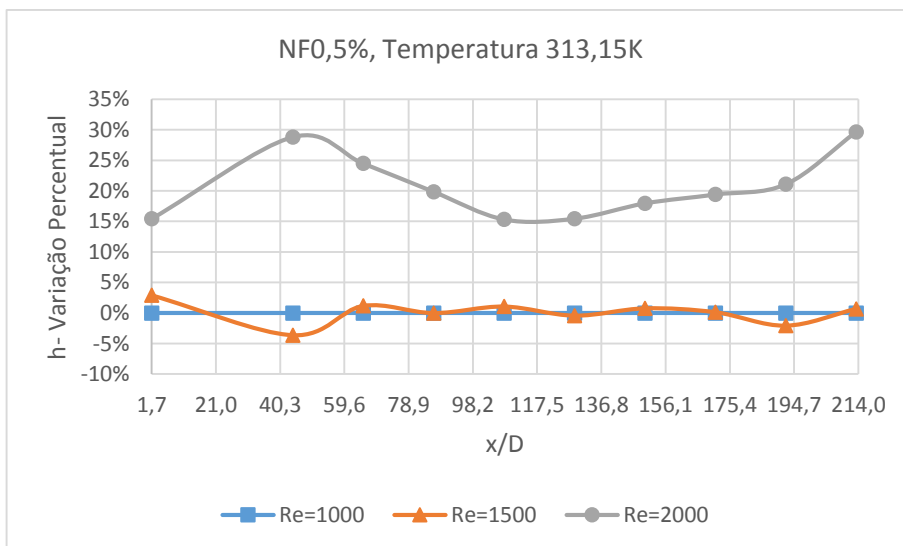


Figura 5.39 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT).

Tal como aconteceu para o nanofluido NF0,25%, o coeficiente de transferência de calor aumenta com o aumento do número de Reynolds, para ensaios realizados à mesma temperatura. No entanto, verifica-se que, para o ensaio realizado à temperatura de 313,15K e um Reynolds de 1500, o coeficiente de transferência de calor por convecção não se altera face ao ensaio realizado com um número de Reynolds de 1000, apresentando uma variação percentual aproximadamente nula ao longo da secção de teste. Face aos ensaios a 293,15K, registou-se um aumento de 5% do h para um Reynolds de 1500 face ao mesmo ensaio com um Reynolds de 1000, que aumentou com a distância axial, atingindo um máximo no final da secção de ensaios de 25%. O mesmo comportamento foi observado para o ensaio a um Reynolds de 2000, com aumento de 15% a 50%.

A mesma análise foi levada a cabo para o fluido base, apresentando-se na Figura 5.40 e na Figura 5.41.

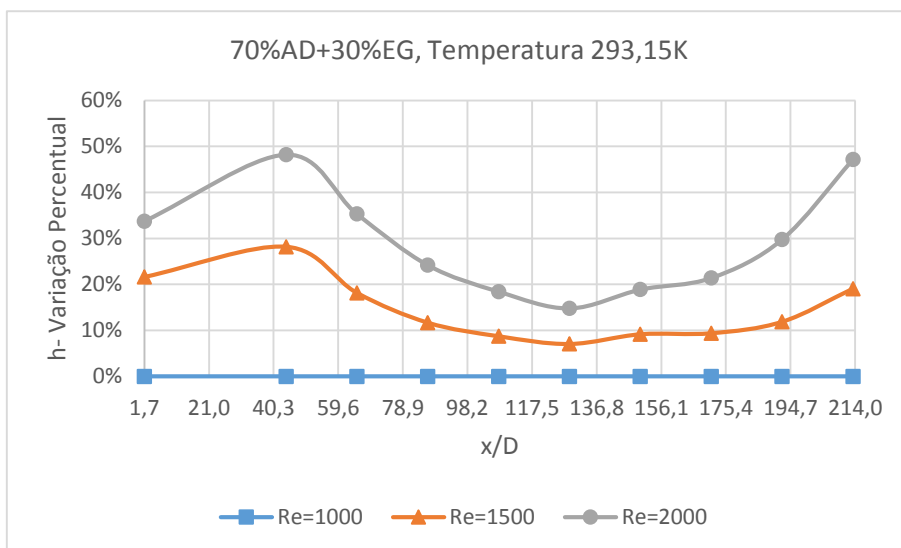


Figura 5.40 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).

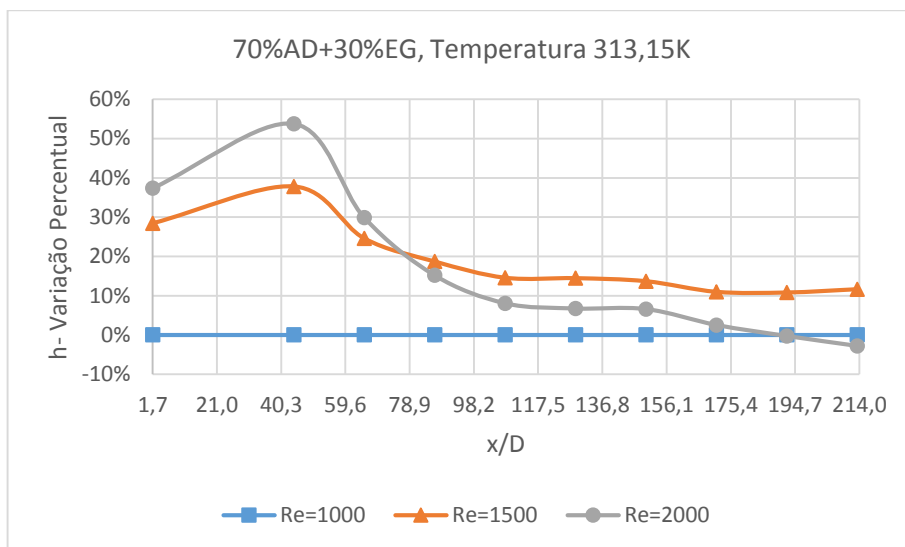


Figura 5.41- Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K (Ensaio com um escoamento com um número de Reynolds de 1000 como fluido de referência; 70%AD+30%EG% - Fluido base).

É possível verificar que, para a temperatura de 293,15K, o comportamento do fluido base é semelhante ao do nanofluido NF0,25%, uma vez que o coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta com o número de Reynolds, tal como seria de esperar segundo a formulação teórica. No entanto, para a temperatura de 313,15K, o fluido base apresenta um coeficiente de transferência de calor inferior para o número de Reynolds de 2000, o que não se esperava a nível teórico. Desta forma, verifica-se que os ensaios realizados para um Reynolds de 2000 e 313,15K pode ter inerentes algum erro experimental que não foi detetado com as análise realizadas anteriormente.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CADA POSIÇÃO AXIAL

Após avaliar os resultados experimentais segundo as variáveis independentes investigadas, nomeadamente a concentração de nanopartículas, o número de Reynolds e a temperatura, segundo a distância axial, decidiu-se averiguar os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos estudados em cada secção axial individualmente, correspondentes à posição de cada termopar disposto ao longo da tubagem individualmente, em função do número de Reynolds. Os resultados registados à entrada da tubagem, correspondentes a um comprimento axial adimensional de $x/D=1,7$, são apresentados no gráfico da Figura 5.42. Uma vez mais, opta-se

pela representação dos resultados unindo os pontos por linhas para ser mais perceptível a variação de resultados com o aumento do número de Reynolds.

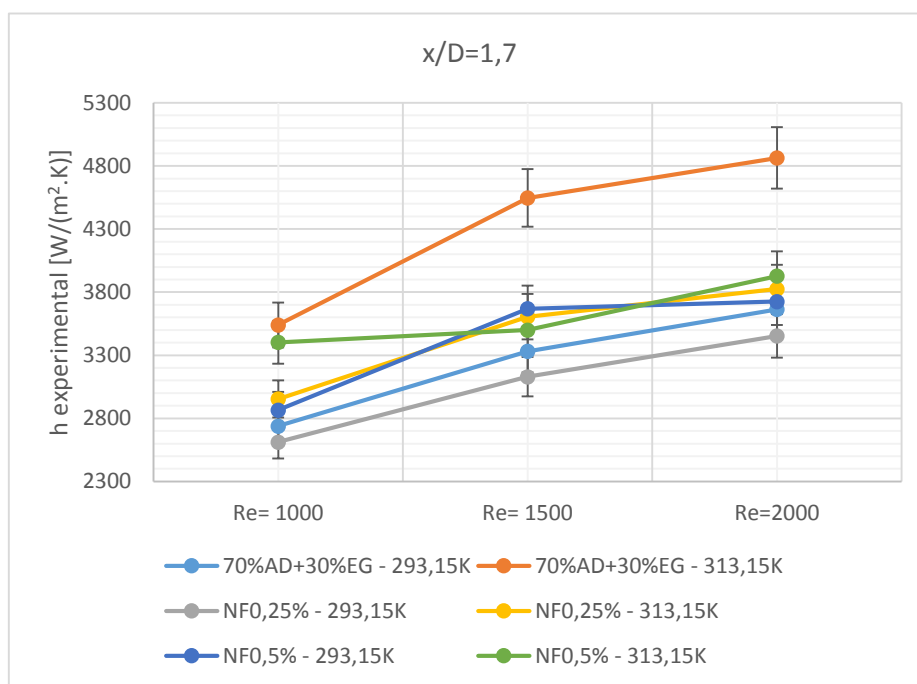


Figura 5.42 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 1,7, (70%AD+30%EG - fluido base; NFO,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

O gráfico da Figura 5.42 apresenta os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos e do fluido base a cada temperatura de testes, em função do número de Reynolds, apresentado no eixo das abcissas. De acordo com a fundamentos teóricos espera-se que, quanto maior o número de Reynolds, maior o coeficiente de transferência de calor por convecção em cada posição axial, como já havia sido referido anteriormente.

À entrada da secção de testes, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção é mais elevado a 313,15K, para cada um dos fluidos, sendo o maior valor registado para o fluido base, seguido do nanofluido NFO,5%, e o menor valor para o nanofluido NFO,25% à temperatura de 293,15K. O gráfico da Figura 5.43 apresenta os resultados registados na posição axial $x/D=44,0$.

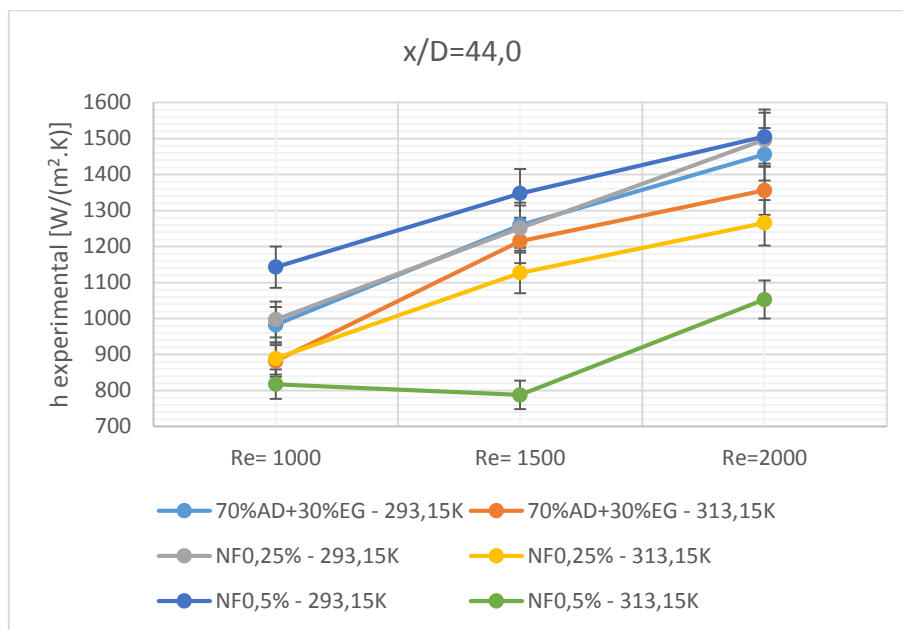


Figura 5.43 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 44,0, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Contrariamente ao que se observou anteriormente, para uma posição axial $x/D=44,0$, ou 18,6% da tubagem, verifica-se que o coeficiente de transferência de calor diminui para os ensaios a 313,15K, face aos realizados a 293,15K. Destaca-se o nanofluido NF0,5%, o qual apresenta os menores valores de h à temperatura de 313,15K, sem alteração com o aumento do número de Reynolds e 1000 para 1500, em contraste com os valores obtidos a 293,15K, temperatura à qual o desempenho deste nanofluido na transferência de calor por convecção é superior ao dos restantes fluidos. O comportamento do nanofluido NF0,25% é semelhante ao fluido base para as mesmas condições a 293,15K, enquanto que a 313,15K a variação é superior. Para as restantes posições axiais, o comportamento é semelhante ao representado na Figura 5.44 que diz respeito à posição axial $x/D=213,3$

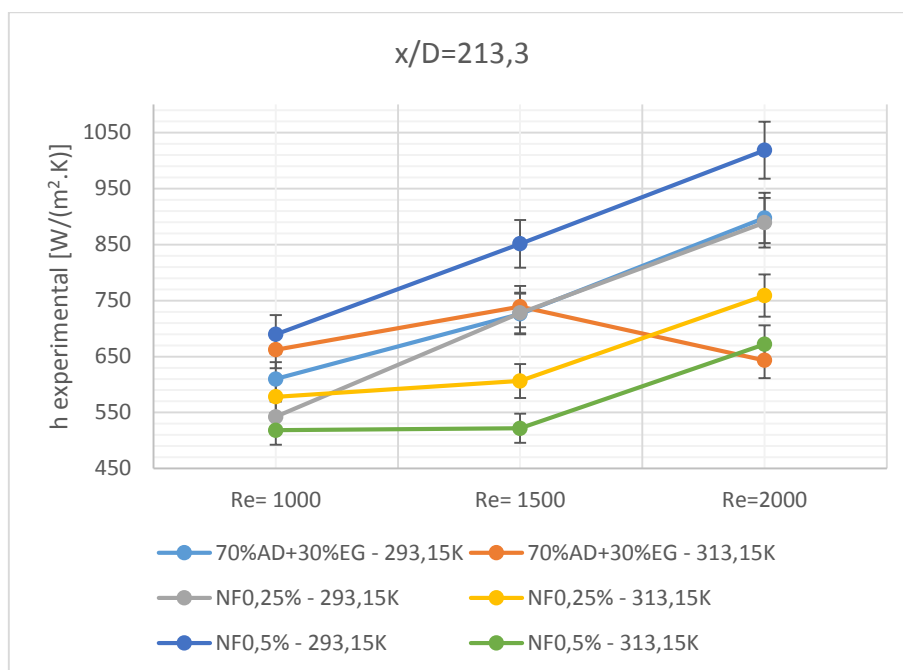


Figura 5.44 - Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 213,3, (70%AD+30%EG - fluido base; NFO,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NFO,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

A variação do coeficiente de transferência de calor entre os fluidos na posição axial mais distante da entrada da secção de testes é análoga às anteriores, na medida que o nanofluido NFO,5% apresenta os valores registados mais elevados, à temperatura de 293,15K e, simultaneamente, os valores de h menores, a 313,15K.

Por outro lado, o coeficiente de transferência de calor do fluido base a 313,15K diminui com o aumento do número de Reynolds de 1500 para 2000, ao contrário do que seria esperado. Este comportamento registou-se para todas as posições axiais dos termopares, a partir da posição $x/D=44,0$, e podem ser encontrados nos Anexos. Apesar de, para este número de Reynolds, os nanofluidos testados à temperatura de 313,15K ultrapassarem o fluido base quando sujeito às mesmas condições, para o coeficiente de transferência de calor, o comportamento do fluido base sob estas condições de ensaio não apresenta o esperado segundo os fundamentos teóricos, tal como foi anteriormente referido.

5.5 ENSAIOS COM ESCOAMENTOS COM O MESMO CAUDAL

Algumas investigações presentes na literatura apontam para o facto de que, averiguar o desempenho dos nanofluidos na transferência de calor por convecção face ao fluido base segundo o número de Reynolds, pode conduzir a resultados enganadores, embora esta metodologia seja a mais frequente, conforme descrito na secção 2.5.1. Por este motivo, no desenvolvimento da presente dissertação, adotou-se a metodologia mais aceite pela comunidade científica, e cujos resultados se discutiram anteriormente. No entanto, como acima referido e presente na secção 2.5.1, alguns autores consideram que esta metodologia pode conduzir a falsas conclusões, já que o número de Reynolds representa o balanceamento entre as forças de inércia e as forças viscosas, representando a influência de um conjunto de variáveis independentes, nomeadamente a velocidade do escoamento, a geometria da tubagem, a densidade e a viscosidade do fluido (Chandrasekar, Suresh e Senthilkumar, 2012). Deste modo, segundo estes autores, a análise da transferência de calor por convecção utilizando o número de Reynolds como variável independente não possibilita avaliar o contributo real de um parâmetro relacionado com a condição do escoamento do fluido, mas sim um conjunto de contributos independentes cuja influência na transferência de calor é particular. Assim, estes autores indicam que a análise da transferência de calor por convecção deve ser levada a cabo considerando a velocidade do escoamento como variável independente, que avalia a influência das características do escoamento do fluido na transferência de calor, ao invés do número de Reynolds, por apresentar apenas esse único contributo, e não uma multiplicidade de contributos resultante do balanceamento de propriedades termofísicas, características do escoamento e geometria da tubagem. Como tal, além dos ensaios realizados de acordo com o plano de experiências traçado, foram realizados ensaios com vista a caracterização do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos face ao fluido base, com base na mesma velocidade de escoamento.

Assim, realizaram-se ensaios com os nanofluidos produzidos e com o fluido base à temperatura de 293,15K e 313,15K, e caudal volúmico de 1093ml/min.

Para cada conjunto de condições, velocidade de escoamento e temperatura, realizaram-se pelo menos dois ensaios, a fim de assegurar a repetibilidade dos resultados obtidos, tendo apresentado variações à média de, aproximadamente 5%, pelo que se considerou que os resultados apresentam

fiabilidade. Os resultados da avaliação de repetibilidade destes ensaios podem ser encontrados nos Anexos.

Os resultados do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial dos nanofluidos e do fluido base sob as condições de ensaio definidas, apresentam-se no gráfico da

Figura 5.45, com exceção dos valores obtidos pelo primeiro termopar de superfície, devido à dificuldade de representar estes resultados com a mesma escala que os restantes. Desta forma, a Figura 5.46 apresenta os resultados referentes ao coeficiente de transferência de calor por convecção registados para a posição axial correspondentes ao primeiro termopar de superfície.

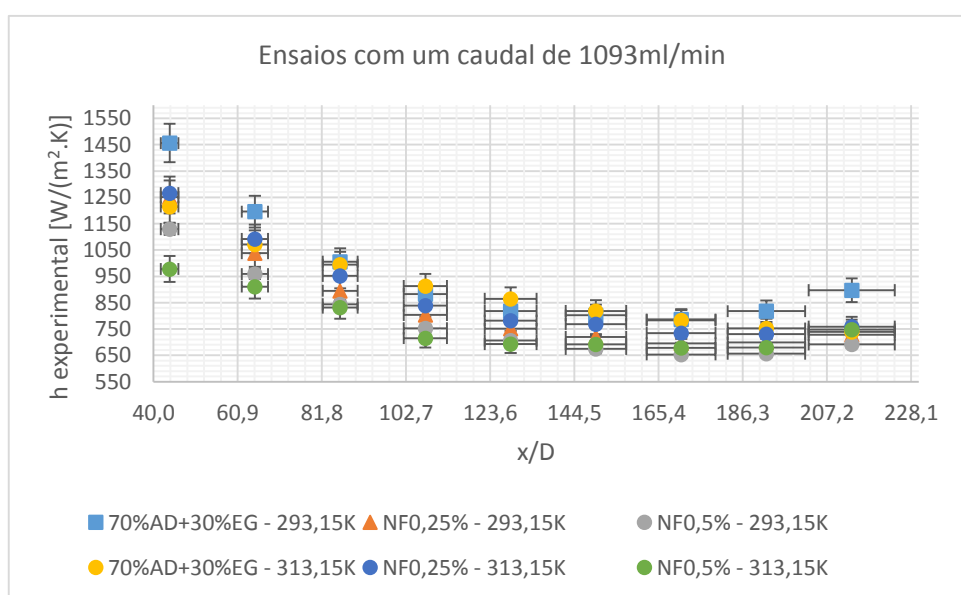


Figura 5.45 - Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados com um caudal volumétrico de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Ao observar os resultados apresentados, é possível constatar que o fluido base apresenta os valores mais elevados do coeficiente de transferência de calor por convecção, à temperatura de 293,15K, e que o nanofluido NF0,5% apresenta os valores mais baixos deste coeficiente, em cada posição axial, à mesma temperatura.

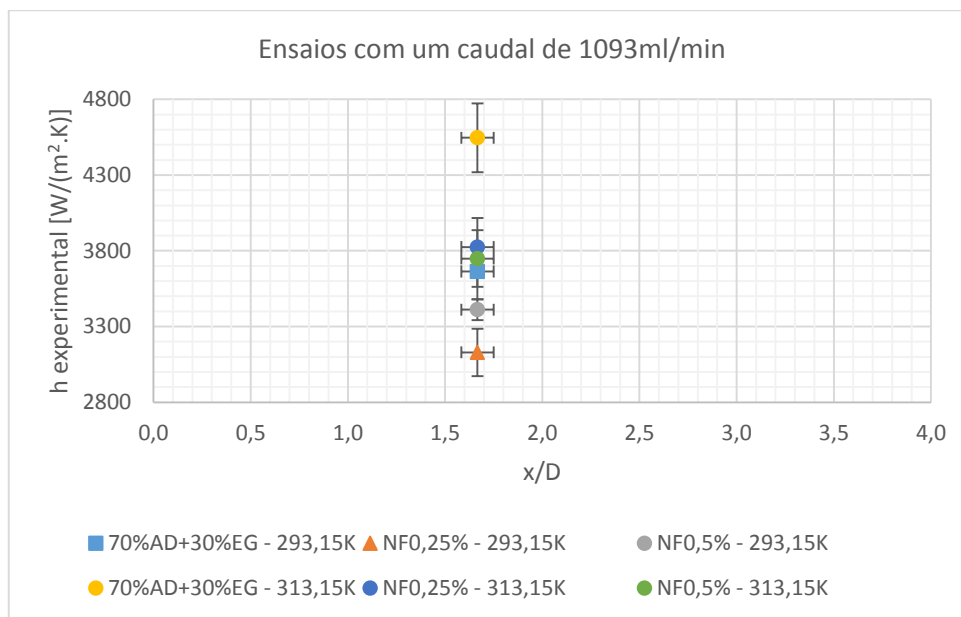


Figura 5.46 - Coeficiente de transferência de calor por convecção registado para cada fluido na posição axial adimensional (x/D) correspondente o primeiro termopar de superfície para os ensaios realizados com um caudal volumico de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

De seguida, realizou-se uma análise quantitativa dos resultados, que se apresenta nos gráficos da Figura 5.47 e da Figura 5.48, onde se representou a variação percentual do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção para cada um dos fluidos testados em relação ao fluido base a 293,15K, em função da posição axial, e à temperatura de 313,15K, respetivamente.

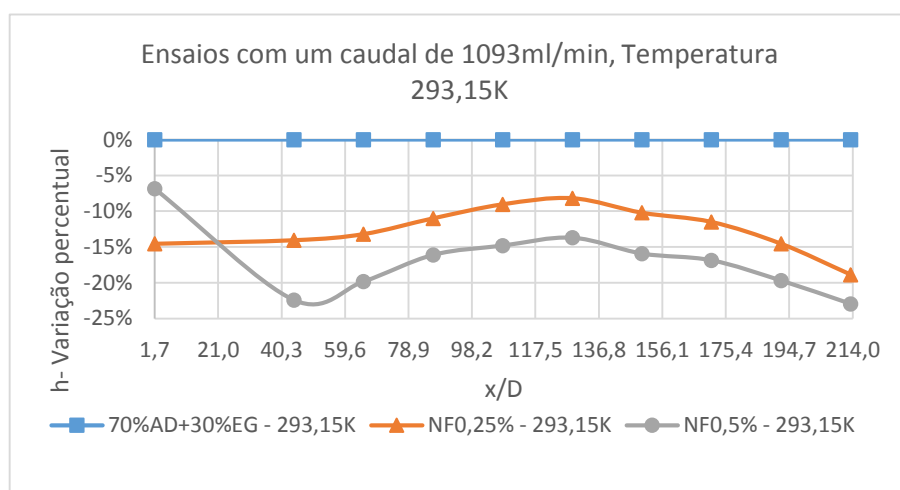


Figura 5.47 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 293,15K e um escoamento com um caudal de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

Ao analisar o gráfico apresentado, verifica-se que ambos os nanofluidos apresentam um coeficiente de transferência de calor por convecção inferior ao fluido base a 293,15K, uma diminuição superior a 10% para o nanofluido NF0,25% e superior a 15% para o NF0,5%. Contrariamente ao que se havia verificado para os ensaios com escoamentos com números de Reynolds de 1000, 1500 e 2000 a 293,15K, o nanofluido NF0,5% apresenta um desempenho na transferência de calor por convecção inferior ao do fluido base, mas também inferior ao nanofluido NF0,25%.

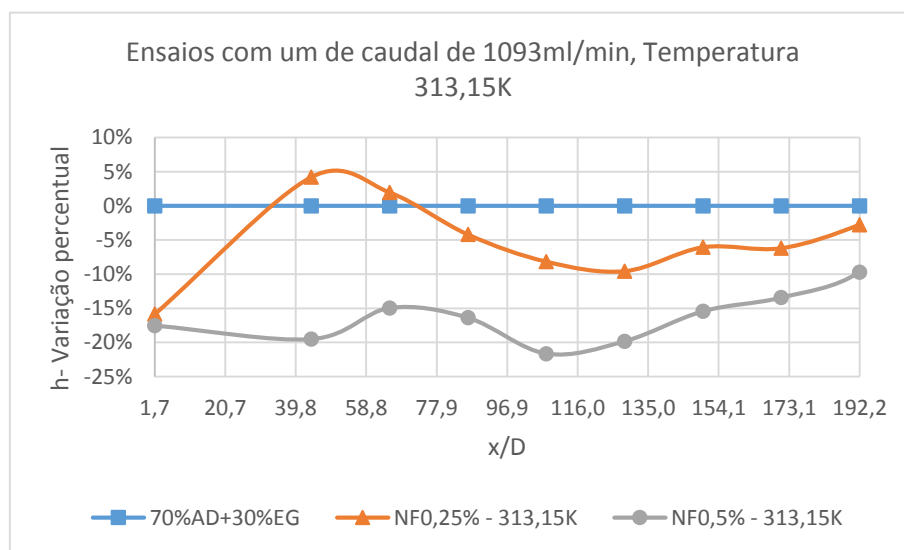


Figura 5.48 - Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em função da distância axial adimensional (x/D) para os ensaios realizados à temperatura de 313,15K e um escoamento com um caudal de 1093ml/min (70%AD+30%EG - fluido base (fluido de referência); NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

À temperatura de 313,15K, os nanofluidos apresentam também um desempenho inferior ao fluido base sob as mesmas condições, com desvios que chegam aos 20% para o nanofluido com maior concentração. Uma vez mais, o nanofluido NF0,5% apresenta um coeficiente de transferência de calor por convecção inferior ao nanofluido NF0,25%.

Face aos resultados contraditórios obtidos quando comparados fluidos com o mesmo caudal, sobretudo à temperatura de 293,15K, procurou-se compreender os fenómenos envolvidos. As Tabela 5.2 e a Tabela 5.3 apresentam os caudais dos ensaios de cada fluido testado, correspondente a cada número de Reynolds, à temperatura de 293,15K e 313,15K, respetivamente.

Como se pode observar na tabela, à temperatura de 293,15K, e para o mesmo número de Reynolds, a velocidade do escoamento é inferior para o fluido base, e aumenta com a concentração de MWCNT no nanofluido. Isto deve-se ao facto de a viscosidade dos nanofluidos ser superior que a do fluido base, e aumentar com a concentração de partículas.

Tabela 5.2 – Caudal volúmico dos fluidos, em ml/min, para cada número de Reynolds, à temperatura de 293,15K.

Nº Reynolds	70%AD+30%EG	NF0,25%	NF0,5%
1000	366,7	471,7	532,0
1500	550,0	707,6	798,0
2000	733,3	943,5	1064,0

Tabela 5.3 - Caudal volúmico dos fluidos, em ml/min, para cada número de Reynolds, à temperatura de 313,15K.

Nº Reynolds	70%AD+30%EG	NF0,25%	NF0,5%
1000	595,0	728,7	795,7
1500	952,0	1093,1	1193,5
2000	1190,0	1457,4	1559,5

À temperatura de 293,15K, a viscosidade do nanofluido NF0,25% é 8% superior à do fluido base, e a do NF0,5% é 18% superior. Apesar da densidade dos nanofluidos também aumentar face ao fluido base, o aumento é inferior a 1% para ambos nanofluidos. Desta forma, ao comparar os nanofluidos segundo o mesmo número de Reynolds, a velocidade dos nanofluidos é x % superior para o nanofluido NF0,25% e x% para o nanofluido NF0,5%.

Por outro lado, segundo a equação 4.2, e uma vez que todos os ensaios foram realizados impondo o mesmo fluxo de calor, o coeficiente de transferência de calor por convecção será tanto maior quanto menor for a diferença

$$T_s(x) - T_f(x) \quad 5.1$$

em cada posição axial, x, e a temperatura do fluido, $T_f(x)$ é obtida a partir da equação 4.12, que pode ser também escrita na forma

$$T_f(x) = T_{f,e} + \frac{q_s'' P}{\rho c_p q} x \quad 5.2$$

Onde q é o caudal volumétrico do escoamento. É possível constatar que, para o mesmo caudal, a diferença entre a temperatura dos nanofluidos no interior da tubagem e a temperatura do fluido depende apenas das suas propriedades termofísicas, a densidade e calor específico. A variação percentual do produto inverso destas propriedades, $\frac{1}{\rho c_p}$, dos nanofluidos em relação ao fluido base, é de 0,2% para o nanofluido NF0,25%, e de 0,3% para o nanofluido NF0,5%, tanto para 293,15K

como para 313,15K. É possível observar que, segundo a relação entre as propriedades, espera-se que a temperatura do nanofluido no interior da tubagem seja superior à do fluido base

$$[T_f(x)]_{NF0,5\%} > [T_f(x)]_{NF0,25\%} > [T_f(x)]_{70\%AD+30\%EG} \quad 5.3$$

Por outro lado, a temperatura da superfície interna da tubagem revelou-se superior para os nanofluidos, quando comparada com a registada para os ensaios do fluido base, isto é

$$[T_s(x)]_{NF0,5\%} > [T_s(x)]_{NF0,25\%} > [T_s(x)]_{70\%AD+30\%EG} \quad 5.4$$

Numa ordem de grandeza superior à da variação percentual registada para a temperatura do fluido. Assim, verificou-se que a variação das temperaturas é superior para os nanofluidos, isto é,

$$[T_s(x) - T_f(x)]_{NF0,5\%} > [T_s(x) - T_f(x)]_{NF0,25\%} > [T_s(x) - T_f(x)]_{70\%AD+30\%EG} \quad 5.5$$

Para a maioria das posições axiais, o que se traduz nos resultados observados, ou seja

$$[h(x)]_{NF0,5\%} < [h(x)]_{NF0,25\%} < [h(x)]_{70\%AD+30\%EG} \quad 5.6$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção é inferior para os nanofluidos, e menor para o nanofluido com uma concentração volúmica de 0,5% de MWCNT. No entanto, seria importante compreender por que motivo a temperatura da superfície interna da tubagem é inferior para os nanofluidos, quando se esperava que a presença das nanopartículas contribuisse para o aumento da remoção de calor da superfície da parede. Pensou-se na possibilidade de a razão estar no desenvolvimento do escoamento. Para tal, analisou-se o comprimento de desenvolvimento hidrodinâmico e termodinâmico.

Verificou-se que, para os ensaios realizados com o caudal de 1093ml/min, o comprimento de desenvolvimento termodinâmico do fluido base é cerca de 10% superior ao dos nanofluidos. Segundo os fundamentos teóricos, o coeficiente de transferência de calor por convecção será maior à entrada da tubagem, decrescendo com a posição axial e o simultâneo desenvolvimento hidrodinâmico e térmico do fluido. Esta pode ser a razão para que, para o caudal 1093ml/min, o fluido base apresenta um melhor desempenho na transferência de calor face aos nanofluidos.

5.6 REFLEXÃO ACERCA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM O MESMO NÚMERO DE REYNOLDS

Para os ensaios realizados para o mesmo número de Reynolds, verificou-se uma vez mais, que a temperatura dos nanofluidos no interior da tubagem é inferior à do fluido base, não só devido às suas propriedades termofísicas, mas também por a velocidade dos nanofluidos ser superior à do fluido base, contribuindo para a diminuição do coeficiente de transferência de calor por convecção. No entanto, a temperatura da superfície interna da secção de testes revelou-se superior à registada nos ensaios com o fluido base, à exceção dos ensaios realizados com o nanofluido NF0,5% a 293,15K.

Para os ensaios a 313,15K, a velocidade dos nanofluidos é também superior à do fluido base. Uma vez que a diferença de velocidade dos nanofluidos face ao fluido base é ainda superior a 313,15K, quando comparada com a relação entre as velocidades dos ensaios realizados a 293,25K, seria de esperar que esta diferença resultasse num coeficiente de transferência de calor superior, o que não acontece. Neste caso, é possível que estejam em jogo as contribuições das restantes propriedades termofísicas dos fluidos. No entanto, com o aumento da temperatura, regista-se um aumento da condutividade e calor específico dos fluidos, a par com a diminuição da densidade e da viscosidade.

Apesar dos esforços para compreender os fenómenos responsáveis pelos resultados obtidos, contrários às expectativas iniciais, e uma vez que, nos ensaios realizados para o mesmo número de Reynolds o comprimento de desenvolvimento termodinâmico dos nanofluidos é superior ao do fluido base, este seria mais um motivo para se esperar que os nanofluidos possibilitassem a redução da temperatura de superfície, não foi possível encontrar explicações para o comportamento registado nos ensaios experimentais.

5.7 ANÁLISE DA DISPERSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

Após terem sido analisados os resultados dos ensaios realizados com os nanofluidos do ponto de vista da caracterização do seu coeficiente de transferência de calor por convecção, procurou-se caracterizar o seu comportamento do ponto de vista do número de Nusselt. O gráfico da Figura 5.49 apresenta a dispersão de pontos correspondente ao número de Nusselt dos nanofluidos sob

todas as condições de ensaio estudadas ao longo da secção de testes, em função do número inverso de Graetz. De referir que a dispersão representada não contém os valores dos ensaios rejeitados anteriormente, enumerados na secção 5.1. Com base na dispersão de resultados experimentais, caracterizou-se o comportamento dos nanofluidos, traçando uma linha de tendência potencial que se apresenta igualmente na Figura 5.49. A curva de tendência determinada é descrita segundo a equação apresentada no gráfico, com um $r^2=0,9538$.

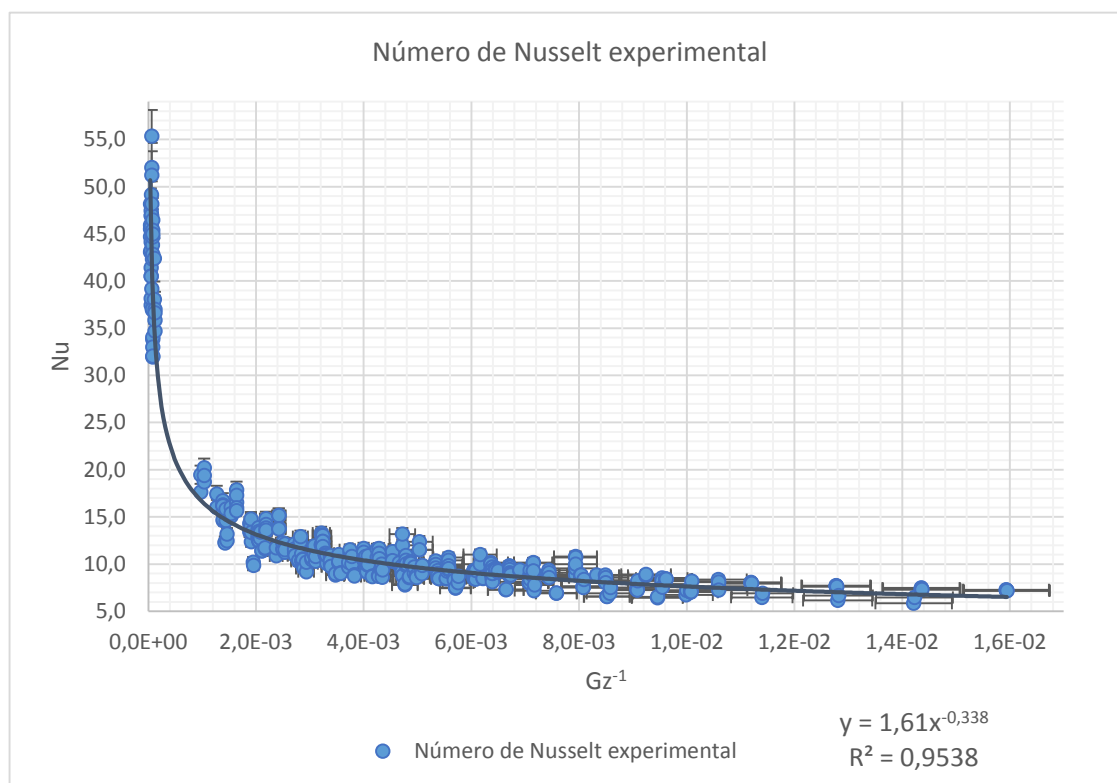


Figura 5.49 - Distribuição do número de Nusselt experimental em função do número de Graetz inverso, para todos os ensaios realizados com os nanofluidos.

Posteriormente, comparou-se a linha de tendência gerada pela nuvem de pontos com a equação do modelo de Shah, que rege o comportamento dos escoamentos internos de fluidos comuns, nomeadamente o fluido base, em regime laminar. A comparação estabelecida apresenta-se no gráfico da Figura 5.50.

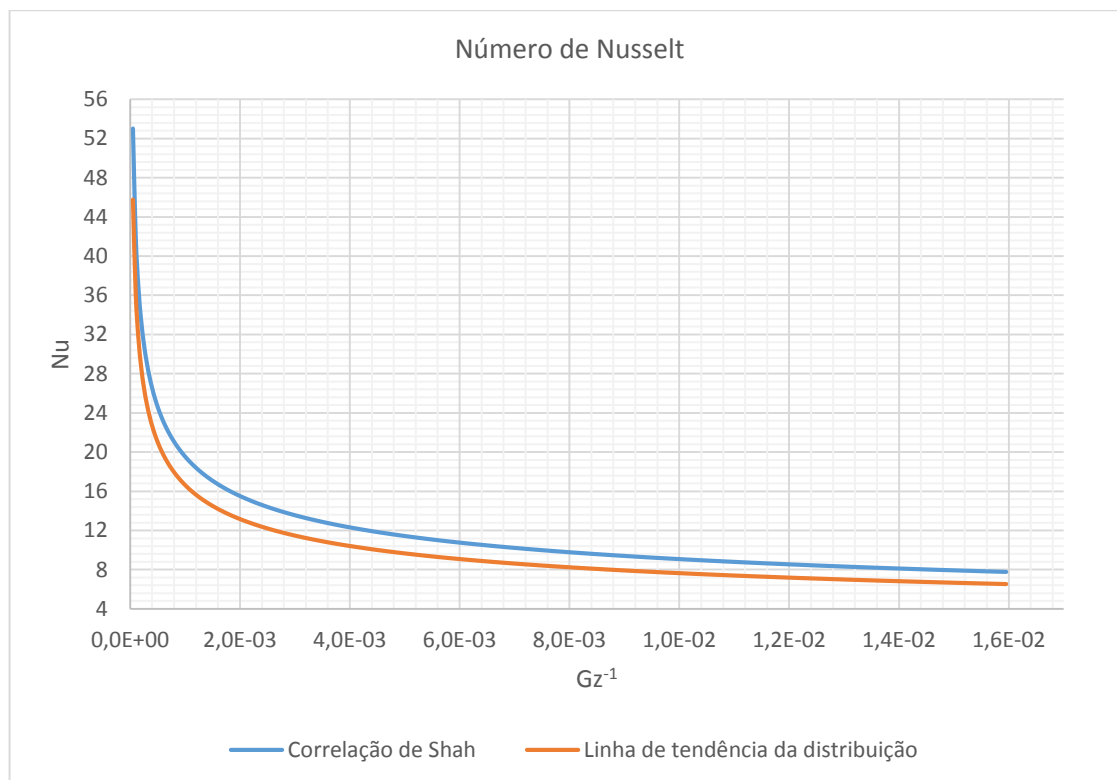


Figura 5.50 – Representação da curva de tendência da distribuição do número de Nusselt dos dados experimentais e da correlação teórica de Shah.

Como se pode observar, a equação que descreve o comportamento dos nanofluidos para as condições estudadas no desenvolvimento desta dissertação, apresenta desvios até 15% para um número de Graetz inversos inferior a 0,016, correspondente ao valor máximo analisado neste trabalho experimental.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento da presente dissertação de mestrado centrou-se na caracterização experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção de sistemas nanofluidicos sujeitos a escoamentos laminares em desenvolvimento num tubo circular horizontal. Para tal, procurou-se compreender as metodologias inerentes à preparação de nanofluidos, assim como os métodos de caracterização destes, do ponto de vista da sua estabilidade coloidal. Foram adicionados nanotubos de carbono de parede múltipla em diluições de 30% em volume de etilenoglicol em água destilada, com concentrações volúmicas de 0,25% e 0,5% de MWCNT, caracterizaram-se as suas propriedades termofísicas e traçou-se um plano de experiências a realizar tendo em conta a revisão bibliográfica levada a efeito.

A maioria dos trabalhos desenvolvidos, no âmbito da transferência de calor por convecção, presentes na literatura, diz respeito a nanofluidos com nanopartículas esféricas. A maioria destas investigações reporta que os nanofluidos apresentam um coeficiente de transferência de calor superior em comparação com o seu fluido base, e que este aumenta significativamente com a concentração de nanopartículas e o número de Reynolds. As mesmas conclusões são apresentadas pela maioria dos trabalhos desenvolvidos com nanofluidos com CNT. No entanto, verificam-se divergências entre os resultados experimentais de diferentes grupos de pesquisa, assim como nas condições de ensaio estabelecidas. As maiorias das investigações são realizadas utilizando, como fatores de análise, o número de Reynolds do escoamento e a concentração de nanopartículas. As condições fronteira estabelecidas são o fluxo de calor constante ou a temperatura da superfície da tubagem constante, embora os valores assumidos de fluxo de calor ou temperatura variem para cada investigação. Por outro lado, a geometria dos dispositivos experimentais também variam de

acordo com o grupo de investigação, mas a maior parte dos trabalhos experimentais são realizados em tubagens horizontais circulares.

De entre as propriedades termofísicas, identificaram-se a densidade, o calor específico, a viscosidade e condutividade como as mais influentes na transferência de calor por convecção, sendo esta última a propriedade termofísica dos nanofluidos mais estudada pela comunidade científica. Verificou-se que todas as propriedades variam com a temperatura, concentração de nanopartículas e tipo de fluido base utilizado, embora os mecanismos que regem o comportamento de cada uma destas propriedades não sejam ainda completamente compreendidos. No entanto, espera-se que a condutividade térmica, a densidade e a viscosidade do nanofluido sejam superiores à do fluido base, sendo esta última a que mais aumenta face à do fluido base, podendo aumentar consideravelmente as necessidades de potência de bombagem.

De acordo com a revisão bibliográfica efetuada, considerou-se a realização de um plano de experiências, no qual foram identificadas as variáveis mais importantes no estudo da transferência de calor por convecção, nomeadamente a geometria dos MWCNT, o tipo de fluido base, a concentração de nanopartículas, a temperatura de ensaio e o número de Reynolds do escoamento. Assim, a geometria dos MWCNT selecionada foi a de diâmetros compreendidos entre 20 e 40 nm, e comprimentos na ordem dos 10 a 30 μm e o fluido base escolhido foi uma diluição de 30% de etilenoglicol em água destilada. Foram produzidos dois nanofluidos, um com uma concentração de 0,25% e outra com 0,5% de MWCNT, e os ensaios foram realizados à temperatura de 293,15K e 313,15K, com escoamentos com três números de Reynolds diferentes: 1000, 1500 e 2000.

Recorreu-se ao dispositivo experimental disponível no laboratório, projetado e desenvolvido por Abreu, em 2010, e posteriormente melhorado por Fernandes, em 2013. Estabeleceu-se a formulação matemática necessária ao cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção com os resultados experimentais, nomeadamente os valores de temperatura dos termopares instalados ao longo da tubagem, tendo sido desenvolvida a metodologia experimental com vista a caracterização dos nanofluidos sob as diferentes condições de ensaio estabelecidas.

Após a averiguação do correto funcionamento do equipamento experimental, e da calibração do mesmo, com a realização de repetidos ensaios com água destilada e fluido base, iniciou-se o estudo de caracterização experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos produzidos.

A análise paramétrica dos resultados obtidos permitiu constatar que, de um modo geral, o desempenho do nanofluido NF0,25% enquanto fluido térmico foi inferior ao respetivo fluido base nas mesmas condições, ou seja, a mesma temperatura de entrada na secção de ensaio e o escoamento com o mesmo número de Reynolds. Em oposição, nos ensaios realizados com o nanofluido NF0,5% à temperatura de 293,15K, verificou-se um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção face ao fluido base, para os diferentes números de Reynolds testados, tendo-se registado um aumento máximo de 15% deste coeficiente no final da secção de testes. Estes resultados apontaram para a existência de uma concentração volúmica de MWCNT, entre 0,25% e 0,5%, a partir da qual o desempenho do nanofluido na transferência de calor é superior ao fluido base. No entanto, à temperatura de 313,15K, o nanofluido com 0,5% de MWCNT apresentou um coeficiente de transferência e calor por convecção inferior, não só em relação ao fluido base, mas também inferior ao registado com o nanofluido com 0,25% de MWCNT, para todos os ensaios com os diferentes números de Reynolds testados.

Para procurar compreender os fenómenos responsáveis pelos resultados obtidos, realizaram-se novos ensaios, desta vez impondo o mesmo caudal volúmico ao escoamento dos nanofluidos e do fluido base, a 293,15K e a 313,15K, como sugerido por alguns autores na literatura. Com esta análise, verificou-se que os todos os nanofluidos testados apresentaram um coeficiente de transferência de calor por convecção inferior ao do fluido base, quer a 293,15K, quer a 313,15K. O nanofluido NF0,5% apresentou mesmo valores inferiores ao nanofluido NF0,25%. Uma vez mais, perante os resultados obtidos, procurou-se compreender as razões inerentes a este comportamento observado.

Recorrendo à formulação matemática do problema em estudo, verificou-se que, para ensaios com o mesmo caudal volúmico, a temperatura do fluido, T_f , é superior para o nanofluido NF0,5%, seguido pelo nanofluido NF0,25%, devido às suas propriedades termofísicas. Por outro lado, constatou-se ainda que a temperatura da superfície da tubagem, T_s , foi também superior para os nanofluidos, sobretudo para o nanofluido com 0,5% de MWCNT, resultado que não era esperado *a priori*, uma vez que se acreditava que a presença das nanopartículas iria promover a diminuição da temperatura da superfície. Porém, constatou-se que, para ensaios com o mesmo caudal, o comprimento de desenvolvimento termodinâmico do fluido base é superior ao dos nanofluidos, onde o nanofluido com maior concentração apresenta o menor comprimento termodinâmico. Assim, quando comparados os resultados para mesma posição axial, x/D , é compreensível que o coeficiente de transferência de calor por convecção seja superior para o fluido base.

A análise exaustiva dos resultados obtidos para os ensaios com o mesmo caudal permitiu uma melhor compreensão dos fenómenos presentes na análise dos ensaios realizados com o mesmo número de Reynolds. Nesta situação, a temperatura dos nanofluidos no eixo da tubagem, T_f , é inferior à do fluido base, pois não está envolvido apenas o contributo das suas propriedades termofísicas, mas também o contributo do caudal do escoamento que, para uma análise com o mesmo número de Reynolds, é superior para os nanofluidos. Assim, evidencia-se o contributo pejorativo desta variável nos resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor por convecção. Por oposição, verifica-se que a temperatura da superfície da tubagem, T_s , é superior nos ensaios realizados com os nanofluidos, com exceção dos ensaios realizados com o nanofluido NF0,5% à temperatura de 293,15K. Ao procurar compreender os fenómenos que possam ter ocorrido, verificou-se que o comprimento de desenvolvimento termodinâmico dos nanofluidos é, nesta situação, superior ao do fluido base, motivo que se esperaria possibilitar a diminuição da temperatura da superfície face ao fluido base, o que só se verificou para os ensaios realizados a 293,15K com o nanofluido NF0,5%. À temperatura de 313,15K, verifica-se que o comprimento de desenvolvimento termodinâmico dos nanofluidos é também superior ao do fluido base e que, embora este seja inferior em valor absoluto ao registado a 293,15K, a variação percentual face ao fluido base é ainda superior à mesma variação a 293,15K. Apesar dos esforços na tentativa de compreender os fenómenos responsáveis pelos resultados obtidos, não foi ainda possível explicar os motivos que levaram a que o desempenho dos nanofluidos na transferência de calor por convecção tenha sido inferior ao do fluido base.

Finalmente, procurou-se avaliar o comportamento dos nanofluidos, no que diz respeito ao número de Nusselt, que representa a contribuição dos fenómenos de convecção e condução na transferência de calor. Para o efeito, reuniram-se todos os resultados obtidos experimentalmente, com ambos os nanofluidos, e traçou-se uma linha de tendência sobre a nuvem de pontos. Esta, que apresentou um r^2 de, aproximadamente, 0,95, foi comparada com a equação de Shah, e verificou-se que o desvio entre as previsões do número de Nusselt e a curvas de tendência é de 15%. Dada a sensibilidade do dispositivo experimental utilizado, considerou-se que o modelo de Shah representa uma previsão teórica aceitável do comportamento dos nanofluidos ensaiados sob as condições de ensaio testadas, e para um intervalo do número de Graetz inverso de 0 a 0,016.

Os nanofluidos produzidos para o desenvolvimento de todo o trabalho experimental revelaram um bom comportamento de estabilidade coloidal, apresentando-se como misturas homogêneas durante várias semanas, sem presença de aglomerados e com valores de viscosidade consistentes

com os existentes na base de dados do grupo de investigação. No entanto, vários dias após terem sido realizados todos os ensaios experimentais, verificou-se que os nanofluidos apresentavam separação de fases, com sedimentação das nanopartículas. Para procurar compreender o que poderia ter sucedido, realizaram-se novos ciclos de ultrassons numa amostra de 50ml de nanofluido de NF0,25%, sem que estes tivessem qualquer efeito na restituição da qualidade da mistura. De seguida, sujeitou-se uma amostra de fluido de NF0,5% estável, que não havia sido testado no dispositivo experimental, a ciclos de temperatura entre os 283,15K e os 333,15K, por um período de 20 horas. No final, o fluido apresentava um comportamento normal, sem sinais de sedimentação ou separação de fases.

De acordo com os resultados dos testes de avaliação das amostras de nanofluidos, foi possível compreender que estes não foram danificados pela temperatura, ao mesmo tempo que a aplicação de novos ciclos de ultrassons não possuem efeitos visíveis na recuperação da estabilidade coloidal da mistura, fazendo crer que a separação de fases não se encontra relacionada com o equilíbrio das forças de van der Waals, o que leva a considerar que possa ter ocorrido a destruição das ligações dos grupos carboxílicos, adicionados através da funcionalização covalente dos MWCNT. Por outro lado, questionou-se a possibilidade de esta alteração na mistura coloidal ter ocorrido devido aos fenómenos que se desenvolvem no interior do dispositivo experimental. Além da temperatura, existe a passagem de corrente alternada na superfície exterior da tubagem da secção de testes, que alimenta a banda resistiva que mantém o fluxo de calor constante. Pensa-se que este fenómeno pode estar de alguma forma relacionado com a alteração na estabilidade dos nanofluidos.

Não se encontra, para já, na literatura qualquer explicação que permita compreender os resultados obtidos, quer no que à estabilidade coloidal diz respeito, quer relativamente aos resultados verificados para os nanofluidos, sobretudo nos ensaios realizados a 313,15K e, portanto, torna-se fundamental proceder a mais medições no futuro, de modo a compreender se o nanofluido com 0,5% de MWCNT, pela concentração que detém, de algum modo estabelece uma dinâmica molecular disruptiva no que concerne a transferência de calor, marcando uma tendência para concentrações superiores ou se é apenas um fenómeno relacionado com o aparato experimental e com a aquisição de dados efetuada e que, portanto, carece revisão. No âmbito deste trabalho as medições foram realizadas e repetidas exaustivamente, tendo-se prestado grande atenção à análise de erros por forma a excluir essa componente nesta incerteza. No entanto, a mesma prevalece sendo necessário avaliar outros nanofluidos com outras concentrações, o que se deixa como proposta de trabalho futuro.

Por fim, em resposta à pergunta colocada no início do desenvolvimento deste trabalho de dissertação: “Em que medida um determinado nanofluido é favorável face a um fluido convencional, considerando um conjunto de condições, nomeadamente, a concentração volúmica de nanopartículas, a temperatura de ensaio e características do escoamento?”, pode afirmar-se que, para uma temperatura de 293,15K, números de Reynolds entre 1000 e 2000, o nanofluido com uma diluição de 30% de etilenoglicol em água destilada e uma concentração volúmica de 0,5% de MWCNT apresenta o coeficiente de transferência de calor por convecção superior ao do fluido base sendo, por isso, favorável a sua utilização ao invés do fluido base. No entanto, é necessário ter em consideração que estes resultados foram obtidos para um escoamento em desenvolvimento, com um número de Graetz inverso compreendido no intervalo 0 a 0,016, e não devem ser extrapolados além destes limites, e que novos trabalhos experimentais são necessários para consolidar as observações e conclusões retiradas no âmbito desta dissertação de mestrado.

REFERÊNCIAS

ABREU, Bruno *et al.* - Experimental characterization of convective heat transfer with MWCNT based nanofluids under laminar flow conditions. **Heat and Mass Transfer**. . ISSN 0947-7411. 50:1 (2013) 65–74. doi: 10.1007/s00231-013-1226-8.

ABREU, Bruno Alexandre - **Caracterização de nanofluidos do ponto de vista termo-físico** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2010 Disponível em WWW:<URL:http://ria.ua.pt/handle/10773/3914>.

AFONSO, Luís Pedro Martins - **Modelos reológicos de nanofluidos**. [S.l.] : Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2015

AHUJA, Avtar Singh - Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. I. Experiments and results. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 46:8 (1975) 3408. doi: 10.1063/1.322107.

AKOH, Hiroshi *et al.* - Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. **Journal of Crystal Growth**. . ISSN 00220248. 45:C (1978) 495–500. doi: 10.1016/0022-0248(78)90482-7.

ALADAG, Bahadir *et al.* - Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures. **Applied Energy**. . ISSN 03062619. 97:2012) 876–880. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.101.

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 nanotube suspension (carbon nanofluid). **Nanotechnology**. . ISSN 0957-4484. 19:31 (2008) 315701. doi: 10.1088/0957-4484/19/31/315701.

AMROLLAHI, A. *et al.* - Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 37:6 (2010) 717–723. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.003.

ANOOP, K. B. *et al.* - Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 106:3 (2009) 034909. doi: 10.1063/1.3182807.

ANOOP, K. B.; SUNDARARAJAN, T.; DAS, Sarit K. - Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 52:9-10 (2009) 2189–2195. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.063.

ARAVIND, S. S. Jyothirmayee *et al.* - Investigation of Structural Stability, Dispersion, Viscosity, and Conductive Heat Transfer Properties of Functionalized Carbon Nanotube Based Nanofluids. **Journal of Physical Chemistry C**. . ISSN 1932-7447. 115:34 (2011) 16737–16744. doi: 10.1021/jp201672p.

ASHTIANI, D.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; PAKDAMAN, M. Fakoor - An experimental investigation

on heat transfer characteristics of multi-walled CNT-heat transfer oil nanofluid flow inside flattened tubes under uniform wall temperature condition. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 39:9 (2012) 1404–1409. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.017.

ASIRVATHAM, Lazarus Godson *et al.* - Convective heat transfer of nanofluids with correlations. **Particuology**. . ISSN 16742001. 9:6 (2011) 626–631. doi: 10.1016/j.partic.2011.03.014.

ASSAEL, M. J. *et al.* - Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water. **International Journal of Thermophysics**. . ISSN 0195-928X. 25:4 (2004) 971–985. doi: 10.1023/B:IJOT.0000038494.22494.04.

ASSAEL, M. J. *et al.* - Thermal conductivity of nanofluids - Experimental and theoretical. **International Journal of Thermophysics**. 27:4 (2006) 999–1017.

BANDYOPADHYAYA, Rajdip *et al.* - Stabilization of Individual Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions. **Nano Letters**. . ISSN 1530-6984. 2:1 (2002) 25–28. doi: 10.1021/nl010065f.

BOTHA, SS Subelia Senara - Synthesis and characterization of nanofluids for cooling applications. (2006).

BRUGGEMAN, D. A. G. - The calculation of various physical constants of heterogeneous substances. I. The dielectric constants and conductivities of mixtures composed of isotropic substances. **Ann. Phys. (Berlin, Ger.)**. . ISSN 00033804. 24:1935) 636–664.

BUONGIORNO, J. - Convective Transport in Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 128:3 (2006) 240.

CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; CHANDRA BOSE, A. - Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 34:2 (2010) 210–216. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.10.022.

CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; SENTHILKUMAR, T. - Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 16:6 (2012) 3917–3938. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.013.

CHEN, Haisheng *et al.* - Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. **Chemical Physics Letters**. . ISSN 00092614. 444:4-6 (2007) 333–337. doi: 10.1016/j.cplett.2007.07.046.

CHEN, Haisheng *et al.* - Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids). **Powder Technology**. . ISSN 00325910. 183:1 (2008) 63–72. doi: 10.1016/j.powtec.2007.11.014.

CHEN, Haisheng *et al.* - Rheological behaviour of ethylene glycol-titanate nanotube nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**. . ISSN 1388-0764. 11:6 (2009) 1513–1520. doi: 10.1007/s11051-009-9599-9.

CHEN, Haisheng *et al.* - Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology. **Particuology**. . ISSN 16742001. 7:2 (2009) 151–157. doi:

10.1016/j.partic.2009.01.005.

CHEN, Haisheng; DING, Yulong; TAN, Chunqing - Rheological behaviour of nanofluids. **New Journal of Physics**. . ISSN 1367-2630. 9:10 (2007) 367–367. doi: 10.1088/1367-2630/9/10/367.

CHEN, Lifei *et al.* - Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. **Thermochimica Acta**. . ISSN 00406031. 477:1-2 (2008) 21–24. doi: 10.1016/j.tca.2008.08.001.

CHEN, Lifei; XIE, Huaqing - Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. . ISSN 09277757. 352:1-3 (2009) 136–140. doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.10.015.

CHEN, Quan *et al.* - Aggregation behavior of single-walled carbon nanotubes in dilute aqueous suspension. **Journal of colloid and interface science**. . ISSN 0021-9797. 280:1 (2004) 91–7. doi: 10.1016/j.jcis.2004.07.028.

CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F. - Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 91:23 (2007) 233103. doi: 10.1063/1.2821117.

CHIESA, M.; DAS, Sarit K. - Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. . ISSN 09277757. 335:1-3 (2009) 88–97. doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.10.044.

CHOI, Jongwook; ZHANG, Yuwen - Numerical simulation of laminar forced convection heat transfer of Al₂O₃–water nanofluid in a pipe with return bend. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 55:2012) 90–102. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.12.017.

CHOI, S. U. S. - Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Em **American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED** [Em linha]. [S.l.] : ASME, 1995 Disponível em WWW:<URL:<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0002289550&partnerID=tZOtx3y1>>.

CHOI, S. U. S. - Nanofluid technology : current status and future research. 1998).

CHOI, S. U. S. *et al.* - Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 79:14 (2001) 2252–2254. doi: 10.1063/1.1408272.

CHOPKAR, Manoj; DAS, Prasanta K.; MANNA, Indranil - Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. **Scripta Materialia**. . ISSN 13596462. 55:6 (2006) 549–552. doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.05.030.

DAS, Sarit Kumar *et al.* - Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 125:4 (2003) 567. doi: 10.1115/1.1571080.

DAS, Sarit Kumar; CHOI, Stephen U. S.; PATEL, Hrishikesh E. - Heat Transfer in Nanofluids—A Review. **Heat Transfer Engineering**. . ISSN 0145-7632. 27:10 (2006) 3–19. doi: 10.1080/01457630600904593.

DAS, SK Sarit K. *et al.* - Nanofluids: Science and Technology. 2007).

DAVIS, RH - The effective thermal conductivity of a composite material with spherical inclusions. **International Journal of Thermophysics**. 1986).

DING, Yulong *et al.* - Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 49:1-2 (2006) 240–250. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009.

DING, Yulong *et al.* - Forced convective heat transfer of nanofluids. **Advanced Powder Technology**. . ISSN 09218831. 18:6 (2007) 813–824. doi: 10.1163/156855207782515021.

DUANGTHONGSUK, Weerapun; WONGWISES, Somchai - Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 35:10 (2008) 1320–1326. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.015.

DUANGTHONGSUK, Weerapun; WONGWISES, Somchai - Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 33:4 (2009) 706–714. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.01.005.

DUANGTHONGSUK, Weerapun; WONGWISES, Somchai - An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 53:1-3 (2010) 334–344. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024.

DUNCAN, MA; ROUVRAY, DH - Microclusters. **Scientific American;(USA)**. 1989).

EASTMAN, J. A. *et al.* - Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 78:6 (2001) 718–720. doi: 10.1063/1.1341218.

EASTMAN, J. A. *et al.* - THERMAL TRANSPORT IN NANOFUIDS 1. **Annual Review of Materials Research**. . ISSN 1531-7331. 34:1 (2004) 219–246. doi: 10.1146/annurev.matsci.34.052803.090621.

ESUMI, K. *et al.* - Chemical treatment of carbon nanotubes. **Carbon**. . ISSN 0008-6223. 34:2 (1996) 279–281.

FAKOOR PAKDAMAN, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; RAZI, P. - An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 40:2012) 103–111. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.02.005.

FAKOOR-PAKDAMAN, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; RAZI, P. - An empirical study on the pressure drop characteristics of nanofluid flow inside helically coiled tubes. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 65:2013) 206–213. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.10.014.

FENG, Yongjin *et al.* - The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. **Journal of Physics D: Applied Physics**. . ISSN 0022-3727. 40:10 (2007) 3164–3171. doi: 10.1088/0022-3727/40/10/020.

FERNANDES, Fábio Alexandre Teixeira - **Caracterização da transferência de calor em nanofluidos**

[Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, [s.d.] [Consult. 19 out. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://ria.ua.pt/handle/10773/12560?mode=full&submit_simple=mostrar+registo+em+formato+completo>.

FONSECA, Maria Alexandra *et al.* - Carbon Nanotubes in a Fluidic Medium: Critical Analysis. Em SUZUKI, SATORU (Ed.) - **Physical and Chemical Properties of Carbon Nanotubes** [Em linha]. [S.l.] : InTech, 2013 Disponível em WWW:<URL:http://dx.doi.org/10.5772/46029>. ISBN 978-953-51-1002-6. p. 3–30.

FREITAS, Sylvio Michael Olim De - **Nanofluids for heat exchanger improvement: a numerical approach** [Em linha]. Aveiro : Universidade de Aveiro, 212AD Disponível em WWW:<URL:http://ria.ua.pt/handle/10773/9885?mode=full&submit_simple=mostrar+registo+em+formato+completo>.

GARG, J. *et al.* - Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 103:7 (2008) 074301. doi: 10.1063/1.2902483.

GARG, Paritosh *et al.* - An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 52:21-22 (2009) 5090–5101. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.029.

GHAZVINI, M. *et al.* - Heat Transfer Properties of Nanodiamond–Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow. **Heat Transfer Engineering**. . ISSN 0145-7632. 33:6 (2012) 525–532. doi: 10.1080/01457632.2012.624858.

GHOZATLOO, Ahmad; RASHIDI, Alimorad; SHARIATY-NIASSAR, Mojtaba - Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 53:2014) 136–141. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.018.

GUPTA, Munish *et al.* - A comprehensive review of experimental investigations of forced convective heat transfer characteristics for various nanofluids. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**. . ISSN 1823-0334. 9:1 (2014) 1–21. doi: 10.1186/s40712-014-0011-x.

HABIBZADEH, Sajjad *et al.* - Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route. **Chemical Engineering Journal**. . ISSN 13858947. 156:2 (2010) 471–478. doi: 10.1016/j.cej.2009.11.007.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. - Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**. . ISSN 0196-4313. 1:3 (1962) 187–191. doi: 10.1021/i160003a005.

HASHIN, Z.; SHTRIKMAN, S. - A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. **Journal of applied Physics**. 1962).

HASSELMAN, DPH; JOHNSON, LF - Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance. **Journal of Composite Materials**. 1987).

HE, Qinbo *et al.* - Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change

material (PCM) in low temperature cool storage. **Energy Conversion and Management**. . ISSN 01968904. 64:2012) 199–205. doi: 10.1016/j.enconman.2012.04.010.

HE, Yurong *et al.* - Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 50:11-12 (2007) 2272–2281. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024.

HERNADI, K. *et al.* - Catalytic synthesis and purification of carbon nanotubes. **Synthetic Metals**. 1996).

HILDING, Jenny *et al.* - Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids. **Journal of Dispersion Science and Technology**. . ISSN 0193-2691. 24:1 (2003) 1–41. doi: 10.1081/DIS-120017941.

HO, Ming Xi; PAN, Chin - Optimal concentration of alumina nanoparticles in molten Hitec salt to maximize its specific heat capacity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 70:2014) 174–184. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.078.

HSIEH, Yu-chen *et al.* - Thermal Analysis of Multi-walled Carbon Nanotubes by Kissinger 's Corrected Kinetic Equation. **Aerosol and Air Quality Research**. . ISSN 16808584. 10:2010) 212–218. doi: 10.4209/aaqr.2009.08.0053.

HWANG, Y. *et al.* - Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. **Current Applied Physics**. . ISSN 15671739. 6:SUPPL. 1 (2006) e67–e71. doi: 10.1016/j.cap.2006.01.014.

HWANG, Y. *et al.* - Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. **Thermochimica Acta**. . ISSN 00406031. 455:1-2 (2007) 70–74. doi: 10.1016/j.tca.2006.11.036.

HWANG, Y. J. *et al.* - Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. **Curr Appl Phys, in press**. . ISSN 15671739. 6:6 (2006) 1068–1071. doi: 10.1016/j.cap.2005.07.021.

ILYAS, Suhaib Umer; PENDYALA, Rajashekhar; MARNENI, Narahari - Preparation, Sedimentation, and Agglomeration of Nanofluids. **Chemical Engineering & Technology**. . ISSN 1521-4125. 37:12 (2014) 2011–2021. doi: 10.1002/ceat.201400268.

INCROPERA, Frank P. *et al.* - **Fundamentals of Heat and Mass Transfer** Dekker Mechanical Engineering. [Em linha]. [S.l.] : John Wiley & Sons, 2007 Disponível em WWW:<URL:http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6008324>. ISBN 9780471457282.

JEFFREY, D. J. - Conduction Through a Random Suspension of Spheres. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. . ISSN 1364-5021. 335:1602 (1973) 355–367. doi: 10.1098/rspa.1973.0130.

JIANG, Weiting; DING, Guoliang; PENG, Hao - Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 48:6 (2009) 1108–1115. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.012.

JU, Y. Sungtaek; KIM, Jichul; HUNG, Ming-Tsung - Experimental Study of Heat Conduction in

- Aqueous Suspensions of Aluminum Oxide Nanoparticles. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 130:9 (2008) 092403. doi: 10.1115/1.2945886.
- JUNG, Jung-Yeul; OH, Hoo-Suk; KWAK, Ho-Young - Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 52:1-2 (2009) 466–472. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.033.
- KANAGARAJ, S.; PONMOZHI, J.; VARANDA, FR - Rheological study of nanofluids at different concentration of carbon nanotubes. **19th national & 8th ISHMT-ASME heat mass transfer conf January**. 2008) 3–5.
- KANG, Hyun Uk; KIM, Sung Hyun; OH, Je Myung - Estimation of Thermal Conductivity of Nanofluid Using Experimental Effective Particle Volume. **Experimental Heat Transfer**. . ISSN 0891-6152. 19:3 (2006) 181–191. doi: 10.1080/08916150600619281.
- KATHIRAVAN, R. *et al.* - Pool boiling characteristics of multiwalled carbon nanotube (CNT) based nanofluids over a flat plate heater. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 54:5-6 (2011) 1289–1296. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.10.002.
- KEBLINSKI, P. *et al.* - Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 45:4 (2002) 855–863. doi: 10.1016/S0017-9310(01)00175-2.
- KEIDAR, M.; WAAS, AM - On the conditions of carbon nanotube growth in the arc discharge. **Nanotechnology**. 2004).
- KHANAFAER, Khalil; VAFAI, Kambiz - A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 54:19-20 (2011) 4410–4428. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048.
- KIM, HJ Ho Jin; BANG, In Cheol IC; ONOE, Jun - Characteristic stability of bare Au-water nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. **Optics and Lasers in Engineering**. . ISSN 01438166. 47:5 (2009) 532–538. doi: 10.1016/j.optlaseng.2008.10.011.
- KIM, JY; HAN, SI; HONG, S. - Effect of modified carbon nanotube on the properties of aromatic polyester nanocomposites. **Polymer**. 2008).
- KIM, Young Jo; MA, Hongbin; YU, Qingsong - Plasma nanocoated carbon nanotubes for heat transfer nanofluids. **Nanotechnology**. . ISSN 1361-6528. 21:29 (2010) 295703. doi: 10.1088/0957-4484/21/29/295703.
- KO, Gwon Hyun *et al.* - An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 50:23-24 (2007) 4749–4753. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.029.
- KOLE, Madhusree; DEY, T. K. - Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 34:6 (2010) 677–683. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009.
- KOO, J.; KLEINSTREUER, C. - A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of**

Nanoparticle Research. 2004).

KRONBERG, Bengt; HOLMBERG, Krister; LINDMAN, Björn - **Surface Chemistry of Surfactants and Polymers** [Em linha]. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2014 [Consult. 28 jul. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://doi.wiley.com/10.1002/9781118695968>. ISBN 9781118695968.

KULKARNI, Devdatta P. *et al.* - Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. **Applied Thermal Engineering**. . ISSN 13594311. 28:14-15 (2008) 1774–1781. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.017.

KULKARNI, Devdatta P.; DAS, Debendra K.; VAJHA, Ravikanth S. - Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution. **Applied Energy**. . ISSN 03062619. 86:12 (2009) 2566–2573. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.021.

KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. - Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. **Thermochimica Acta**. . ISSN 00406031. 545:2012) 180–186. doi: 10.1016/j.tca.2012.07.017.

LAMAS, Bruno *et al.* - Assessing colloidal stability of long term MWCNT based nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**. . ISSN 1095-7103. 381:1 (2012) 17–23. doi: 10.1016/j.jcis.2012.05.014.

LAMAS, Bruno *et al.* - Critical analysis of the thermal conductivity models for CNT based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 78:2014) 65–76. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.017.

LAMAS, Bruno Cardoso - **Nanofluids development and characterization for heat exchanging intensification**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2013

LEE, Ji-Hwan *et al.* - Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 51:11-12 (2008) 2651–2656. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.026.

LEE, Ji-Hwan *et al.* - A Review of Thermal Conductivity Data, Mechanisms and Models for Nanofluids. **International Journal of Micro-Nano Scale Transport**. . ISSN 1759-3093. 1:4 (2011) 269–322. doi: 10.1260/1759-3093.1.4.269.

LEE, Seung Won *et al.* - Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 54:1-3 (2011) 433–438. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.026.

LI, Qiang; XUAN, Yimin; WANG, Jian - Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 30:2 (2005) 109–116. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2005.03.021.

LI, Yanjiao *et al.* - A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**. . ISSN 00325910. 196:2 (2009) 89–101. doi: 10.1016/j.powtec.2009.07.025.

- LIU, K. V.; CHOI, U. S.; KASZA, K. E. - Measurement of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries. **Measurements of Pressure Drop and Heat Transfer in Turbulent Pipe Flows of Particulate Slurries**. 1988).
- LIU, Min-Sheng *et al.* - Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 32:9 (2005) 1202–1210. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005.
- LIU, MinSheng; LIN, Mark Chingcheng; WANG, ChiChuan - Enhancements of thermal conductivities with Cu, CuO, and carbon nanotube nanofluids and application of MWNT/water nanofluid on a water chiller system. **Nanoscale research letters**. . ISSN 1556-276X. 6:1 (2011) 297. doi: 10.1186/1556-276X-6-297.
- LIU, Zhen-Hua; LIAO, Liang - Forced convective flow and heat transfer characteristics of aqueous drag-reducing fluid with carbon nanotubes added. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 49:12 (2010) 2331–2338. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.08.001.
- LO, Chih-Hung; TSUNG, Tsing-Tshih; CHEN, Liang-Chia - Ni Nano-Magnetic Fluid Prepared by Submerged Arc Nano Synthesis System (SANSS). **JSME International Journal Series B**. . ISSN 1340-8054. 48:4 (2005) 750–755. doi: 10.1299/jsmeb.48.750.
- LU, Wen-Qiang; FAN, Qing-Mei - Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**. . ISSN 09557997. 32:4 (2008) 282–289. doi: 10.1016/j.engabound.2007.10.006.
- MAHBUBUL, I. M.; SAIDUR, R.; AMALINA, M. A. - Latest developments on the viscosity of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 55:4 (2012) 874–885. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021.
- MAÏGA, Sidi El Bécaye *et al.* - Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. . ISSN 0142727X. 26:4 (2005) 530–546. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004.
- MARTIN, C. A. *et al.* - Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube–epoxy composites. **Composites Science and Technology**. . ISSN 02663538. 64:15 (2004) 2309–2316. doi: 10.1016/j.compscitech.2004.01.025.
- MAXWELL, JC - **A treatise on electricity and magnetism**. [S.l.] : Oxford: Clarendon Press, 1873
- MERCHAN-MERCHAN, Wilson *et al.* - Combustion synthesis of carbon nanotubes and related nanostructures. **Progress in Energy and Combustion Science**. . ISSN 03601285. 36:6 (2010) 696–727. doi: 10.1016/j.pecs.2010.02.005.
- MISSANA, T.; ADELL, A. - On the Applicability of DLVO Theory to the Prediction of Clay Colloids Stability. **Journal of Colloid and Interface Science**. . ISSN 1095-7103. 230:1 (2000) 150–156. doi: 10.1006/jcis.2000.7003.
- MURSHED, S. M. S. M. S.; LEONG, K. C. C.; YANG, C. - Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review. **Applied Thermal Engineering**. . ISSN 13594311. 28:17-18 (2008)

2109–2125. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.005.

MURSHED, S. M. Sohel - Determination of effective specific heat of nanofluids. **Journal of Experimental Nanoscience**. . ISSN 1745-8080. 6:5 (2011) 539–546. doi: 10.1080/17458080.2010.498838.

MURSHED, S. M. Sohel *et al.* - A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 15:5 (2011) 2342–2354. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.016.

MURSHED, S. M. Sohel - Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Specific Heat of Nanofluids. **Heat Transfer Engineering**. . ISSN 0145-7632. 33:8 (2012) 722–731. doi: 10.1080/01457632.2011.635986.

MURSHED, S. M. Sohel; NIETO DE CASTRO, C. A. - Superior thermal features of carbon nanotubes-based nanofluids – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 37:2014) 155–167. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.017.

NAIK, M. T. *et al.* - Experimental investigation into rheological property of copper oxide nanoparticles suspended in propylene glycol-water based fluids. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. . ISSN 1816949X. 5:6 (2010) 29–34.

NAMBURU, P. K. *et al.* - Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. **Micro & Nano Letters**. . ISSN 17500443. 2:3 (2007) 67. doi: 10.1049/mnl:20070037.

NAMBURU, Praveen K. *et al.* - Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 32:2 (2007) 397–402. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2007.05.001.

NAN, C. W.; SHI, Z.; LIN, Y. - A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Chemical Physics Letters**. . ISSN 00092614. 375:5-6 (2003) 666–669. doi: 10.1016/S0009-2614(03)00956-4.

NAN, Ce-Wen *et al.* - Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 85:16 (2004) 3549. doi: 10.1063/1.1808874.

NASEH, Masoud Vesali *et al.* - Fast and clean functionalization of carbon nanotubes by dielectric barrier discharge plasma in air compared to acid treatment. **Carbon**. . ISSN 00086223. 48:5 (2010) 1369–1379. doi: 10.1016/j.carbon.2009.12.027.

NASIRI, Aida *et al.* - Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 35:4 (2011) 717–723. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.01.006.

NGUYEN, C. T. *et al.* - Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. . ISSN 0142727X. 28:6 (2007) 1492–1506. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004.

NGUYEN, C. T. *et al.* - Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN

12900729. 47:2 (2008) 103–111. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.033.

PAK, Bock Choon; CHO, Young I. - HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES. **Experimental Heat Transfer**. . ISSN 0891-6152. 11:2 (1998) 151–170. doi: 10.1080/08916159808946559.

PANG, Changwei; LEE, Jae Won; KANG, Yong Tae - Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 87:2015) 49–67. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.07.017.

PASTORIZA-GALLEGO, M. J. *et al.* - CuO in water nanofluid: Influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity. **Fluid Phase Equilibria**. . ISSN 03783812. 300:1-2 (2011) 188–196. doi: 10.1016/j.fluid.2010.10.015.

PAUL, G. *et al.* - Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 14:7 (2010) 1913–1924. doi: 10.1016/j.rser.2010.03.017.

PAUL, G.; PAL, T.; MANNA, I. - Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. **Journal of colloid and interface science**. . ISSN 1095-7103. 349:1 (2010) 434–7. doi: 10.1016/j.jcis.2010.05.086.

PEÑAS, José R. Vázquez; ORTIZ DE ZÁRATE, José M.; KHAYET, Mohamed - Measurement of the thermal conductivity of nanofluids by the multicurrent hot-wire method. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 104:4 (2008) 044314. doi: 10.1063/1.2970086.

PENG, Haiqing *et al.* - Sidewall carboxylic acid functionalization of single-walled carbon nanotubes. **Journal of the American Chemical Society**. . ISSN 0002-7863. 125:49 (2003) 15174–82. doi: 10.1021/ja037746s.

PHUOC, Tran X.; MASSOUDI, Mehrdad; CHEN, Ruey-Hung Hung - Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 50:1 (2011) 12–18. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.09.008.

PIL JANG, Seok; CHOI, Stephen U. S. - Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 129:5 (2007) 617. doi: 10.1115/1.2712475.

PONMOZHI, J. *et al.* - Thermodynamic and Transport Properties of CNT-Water Based Nanofluids. Em **Journal of Nano Research**. ISBN 978-3-03835-831-2

POPA, Ionel *et al.* - Attractive and repulsive electrostatic forces between positively charged latex particles in the presence of anionic linear polyelectrolytes. **The journal of physical chemistry. B**. . ISSN 1520-5207. 114:9 (2010) 3170–7. doi: 10.1021/jp911482a.

PRADHAN, N. R. *et al.* - The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes. **Nanotechnology**. . ISSN 1361-6528. 20:24 (2009) 245705. doi: 10.1088/0957-4484/20/24/245705.

PRASHER, Ravi *et al.* - Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal

applications. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 89:13 (2006) 133108. doi: 10.1063/1.2356113.

PRASHER, Ravi; BHATTACHARYA, Prajesh; PHELAN, Patrick E. - Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids). **Physical Review Letters**. . ISSN 0031-9007. 94:2 (2005) 025901. doi: 10.1103/PhysRevLett.94.025901.

PRASHER, Ravi; PHELAN, Patrick E.; BHATTACHARYA, Prajesh - Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). **Nano letters**. . ISSN 1530-6984. 6:7 (2006) 1529–34. doi: 10.1021/nl060992s.

RAHIMPOUR, Ahmad *et al.* - Novel functionalized carbon nanotubes for improving the surface properties and performance of polyethersulfone (PES) membrane. **Desalination**. . ISSN 00119164. 286:2012) 99–107. doi: 10.1016/j.desal.2011.10.039.

RASHMI, W. *et al.* - Stability and thermal conductivity enhancement of carbon nanotube nanofluid using gum arabic. **Journal of Experimental Nanoscience**. . ISSN 1745-8080. 6:6 (2011) 567–579. doi: 10.1080/17458080.2010.487229.

REA, Ulzie *et al.* - Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 52:7-8 (2009) 2042–2048.

ROBERTIS, E. DE *et al.* - Application of the modulated temperature differential scanning calorimetry technique for the determination of the specific heat of copper nanofluids. **Applied Thermal Engineering**. . ISSN 13594311. 41:2012) 10–17. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.003.

SAEEDINIA, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; NASR, M. - Experimental study on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow in a horizontal coiled wire inserted tube under constant heat flux. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 36:2012) 158–168. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.09.009.

SAHOO, Nanda Gopal *et al.* - Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. **Progress in Polymer Science**. . ISSN 00796700. 35:7 (2010) 837–867. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2010.03.002.

SAJADI, A. R.; KAZEMI, M. H. - Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 38:10 (2011) 1474–1478. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.007.

SCHNITZLER, MC; ZARBIN, AJG - The effect of process variables on the characteristics of carbon nanotubes obtained by spray pyrolysis. **Journal of Nanoparticle Research**. 2008).

SEKHAR, Y. R.; SHARM, K. V. - Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids at low particle concentrations. **J Exp Nanosci**. [s.d.].

Série II / Número 95 | Química - Boletim da SPQ | Sociedade Portuguesa de Química - [Em linha] [Consult. 8 dez. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/620/article/30001213/swf>.

- SHAFFER, MSP; FAN, X.; WINDLE, AH - Dispersion and packing of carbon nanotubes. **Carbon**. 1998).
- SHAHRUL, I. M. *et al.* - A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 38:2014) 88–98. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.081.
- SHARMA, Pankaj *et al.* - Enhancement of thermal conductivity of ethylene glycol based silver nanofluids. **Powder Technology**. . ISSN 00325910. 208:1 (2011) 7–19. doi: 10.1016/j.powtec.2010.11.016.
- SHIM, JW; PARK, SJ; RYU, SK - Effect of modification with HNO₃ and NaOH on metal adsorption by pitch-based activated carbon fibers. **Carbon**. 2001).
- SHIN, Donghyun; BANERJEE, Debjyoti - Enhancement of specific heat capacity of high-temperature silica-nanofluids synthesized in alkali chloride salt eutectics for solar thermal-energy storage applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 54:5-6 (2011) 1064–1070. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.017.
- SHOKOUHMAND, H.; GHAZVINI, M.; SHABANIAN, J. - Performance analysis of using nanofluids in microchannel heat sink in different flow regimes and its simulation using artificial neural network. **Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE '08)**. 3:[s.d.]
- SOMMERS, Andrew D.; YERKES, Kirk L. - Experimental investigation into the convective heat transfer and system-level effects of Al₂O₃-propanol nanofluid. **Journal of Nanoparticle Research**. . ISSN 1388-0764. 12:3 (2009) 1003–1014. doi: 10.1007/s11051-009-9657-3.
- STARACE, A. K. *et al.* - Nanofluid heat capacities. **J Appl Phys**. 110:[s.d.] 1–5.
- STRANDBERG, Roy; DAS, Debendra K. - Influence of temperature and properties variation on nanofluids in building heating. **Energy Conversion and Management**. . ISSN 01968904. 51:7 (2010) 1381–1390. doi: 10.1016/j.enconman.2010.01.006.
- SURESH, S. *et al.* - Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 38:2012) 54–60. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.11.007.
- SURESH, S.; CHANDRASEKAR, M.; CHANDRA SEKHAR, S. - Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under turbulent flow in a helically dimpled tube. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 35:3 (2011) 542–549. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.008.
- SYAM SUNDAR, L. *et al.* - Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 37:2012) 65–71. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.10.004.
- SYAM SUNDAR, L.; SINGH, Manoj K. - Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 20:2013) 23–35. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.041.
- TALAEI, Zeinab *et al.* - The effect of functionalized group concentration on the stability and thermal

- conductivity of carbon nanotube fluid as heat transfer media. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 38:4 (2011) 513–517. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.12.035.
- TENG, T. P.; HUNG, Y. H. - Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid. **J Exp Nanosci**. [s.d.] 1–12.
- TENG, Tun-Ping; YU, Chao-Chieh - Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 49:2013) 22–30. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.03.007.
- TRISAKSRI, Visinee; WONGWISES, Somchai - Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 11:3 (2007) 512–523. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.010.
- TURGUT, A. *et al.* - Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids. **International Journal of Thermophysics**. . ISSN 0195-928X. 30:4 (2009) 1213–1226. doi: 10.1007/s10765-009-0594-2.
- VAJJHA, Ravikanth S.; DAS, Debendra K. - Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 52:21-22 (2009) 4675–4682. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027.
- VAJJHA, Ravikanth S.; DAS, Debendra K. - A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 55:15-16 (2012) 4063–4078. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048.
- VAJJHA, Ravikanth S.; DAS, Debendra K.; KULKARNI, Devdatta P. - Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 53:21-22 (2010) 4607–4618. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.032.
- VAJJHA, RS Ravikanth S.; DAS, Debendra K. DK - Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 131:7 (2009) 071601. doi: 10.1115/1.3090813.
- VEINGNON, Somjate *et al.* - Development of Carbon Nanotube - Reinforced Silk and Cannabis Fibers by an Electrophoretic Deposition Method. **Materials Science Forum**. . ISSN 02555476. 695:2011) 377–380. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.695.377.
- WAGENER, M.; MURTY, B. S.; GUENTHER, B. - Preparation of metal nanosuspensions by high-pressure dc-sputtering on running liquids. Em **Materials Research Society Symposium - Proceedings** [Em linha]. [S.l.] : Materials Research Society, 1997 Disponível em WWW:<URL:http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0030643762&partnerID=tZOtx3y1>.
- WANG, Bu-Xuan; ZHOU, Le-Ping; PENG, Xiao-Feng - A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. **International Journal of Heat and**

- Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 46:14 (2003) 2665–2672. doi: 10.1016/S0017-9310(03)00016-4.
- WANG, Bu-Xuan; ZHOU, Le-Ping; PENG, Xiao-Feng - Surface and Size Effects on the Specific Heat Capacity of Nanoparticles. **International Journal of Thermophysics**. . ISSN 0195-928X. 27:1 (2006) 139–151. doi: 10.1007/s10765-006-0022-9.
- WANG, Jianli *et al.* - Heat transfer and pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in laminar flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 44:(2013) 716–721. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.09.013.
- WANG, Xiang-Qi Qi; MUJUMDAR, Arun S. - A review on nanofluids - part I: theoretical and numerical investigations. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. . ISSN 0104-6632. 25:4 (2008) 613–630. doi: 10.1590/S0104-66322008000400001.
- WEI, Xiaohao *et al.* - CuS/Cu₂S nanofluids: Synthesis and thermal conductivity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 53:9-10 (2010) 1841–1843. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.006.
- WEN, Dongsheng *et al.* - Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology**. . ISSN 16742001. 7:2 (2009) 141–150. doi: 10.1016/j.partic.2009.01.007.
- WEN, Dongsheng; DING, Yulong - Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**. . ISSN 0887-8722. 18:4 (2004) 481–485. doi: 10.2514/1.9934.
- WEN, Dongsheng; DING, Yulong - Natural convective heat transfer of suspensions of titanium dioxide nanoparticles (nanofluids). **IEEE Transactions On Nanotechnology**. . ISSN 1536-125X. 5:3 (2006) 220–227. doi: 10.1109/TNANO.2006.874045.
- WEPASNICK, Kevin A. *et al.* - Chemical and structural characterization of carbon nanotube surfaces. **Analytical and bioanalytical chemistry**. . ISSN 1618-2650. 396:3 (2010) 1003–14. doi: 10.1007/s00216-009-3332-5.
- WILLIAMS, Wesley; BUONGIORNO, Jacopo; HU, Lin-Wen - 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**. . ISSN 0022-1481. 130:4 (2008) 42412. doi: 10.1115/1.2818775.
- WU, Shuying *et al.* - Preparation and Melting/Freezing Characteristics of Cu/Paraffin Nanofluid as Phase-Change Material (PCM). **Energy & Fuels**. . ISSN 0887-0624. 24:3 (2010) 1894–1898. doi: 10.1021/ef9013967.
- XIE, Huaqing *et al.* - Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 91:2002 (2002) 4568. doi: 10.1063/1.1454184.
- XIE, Huaqing *et al.* - Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 94:2003 (2003) 4967–4971. doi: 10.1063/1.1613374.

- XIE, Huaqing; CHEN, Lifei - Review on the preparation and thermal performances of carbon nanotube contained nanofluids. **Journal of Chemical & Engineering Data**. . ISSN 0021-9568. 56:4 (2011) 1030–1041. doi: 10.1021/je101026j.
- XIE, Huaqing; FUJII, Motoo; ZHANG, Xing - Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 48:14 (2005) 2926–2932. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.040.
- XIE, Huaqing; LI, Yang; YU, Wei - Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows. **Physics Letters A**. . ISSN 03759601. 374:25 (2010) 2566–2568. doi: 10.1016/j.physleta.2010.04.026.
- XUAN, Yimin; LI, Qiang - Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. . ISSN 0142727X. 21:1 (2000) 58–64. doi: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3.
- XUAN, Yimin; LI, Qiang - Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**. . ISSN 00221481. 125:1 (2003) 151. doi: 10.1115/1.1532008.
- XUAN, Yimin; LI, Qiang; HU, Weifeng - Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. **AIChE Journal**. . ISSN 00011541. 49:4 (2003) 1038–1043. doi: 10.1002/aic.690490420.
- XUAN, Yimin; ROETZEL, Wilfried - Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of heat and Mass transfer**. . ISSN 00179310. 43:19 (2000) 3701–3707. doi: 10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
- XUE, Q.; XU, Wen-Mei - A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. **Materials Chemistry and Physics**. . ISSN 02540584. 90:2-3 (2005) 298–301. doi: 10.1016/j.matchemphys.2004.05.029.
- YANG, B.; HAN, Z. H. - Temperature-dependent thermal conductivity of nanorod-based nanofluids. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 89:8 (2006) 083111. doi: 10.1063/1.2338424.
- YANG, Ying *et al.* - Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 48:6 (2005) 1107–1116. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.038.
- YIAMSAWAS, Thaklaew *et al.* - Measurement and Correlation of the Viscosity of Water-Based Al₂O₃ and TiO₂ Nanofluids in High Temperatures and Comparisons with Literature Reports. **Journal of Dispersion Science and Technology**. . ISSN 0193-2691. 34:12 (2013) 1697–1703. doi: 10.1080/01932691.2013.764483.
- YU, W.; CHOI, SUS S. U. S. - The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**. . ISSN 1388-0764. 5:1/2 (2003) 167–171. doi: 10.1023/A:1024438603801.
- YU, Wei *et al.* - Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Powder Technology**. . ISSN 00325910. 197:3 (2010) 218–221. doi: 10.1016/j.powtec.2009.09.016.
- YU, Wei *et al.* - Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared

via phase-transfer method. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. . ISSN 09277757. 355:1-3 (2010) 109–113. doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.11.044.

YU, Wei *et al.* - Experimental investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol based nanofluids containing low volume concentration diamond nanoparticles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. . ISSN 09277757. 380:1-3 (2011) 1–5. doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.11.020.

YU, Wei; XIE, Huaqing - A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. **Journal of Nanomaterials**. . ISSN 16874110. 2012:2012). doi: 10.1155/2012/435873.

YU, Wenhua *et al.* - Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 52:15-16 (2009) 3606–3612. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.036.

ZHANG, Xing; GU, Hua; FUJII, Motoo - Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 31:6 (2007) 593–599. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.06.009.

ZHOU, Sheng-Qi; NI, Rui - Measurement of the specific heat capacity of water-based Al[sub 2]O[sub 3] nanofluid. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 92:9 (2008) 093123. doi: 10.1063/1.2890431.

ZHOU, W.; XU, J.; SHI, W. - Surface modification of multi-wall carbon nanotube with ultraviolet-curable hyperbranched polymer. **Thin Solid Films**. 2008).

ANEXOS

8.1 REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

Para cada conjunto de condições analisadas, isto é, de temperatura e escoamento dos fluidos, realizaram-se pelo menos dois ensaios experimentais. Os resultados do estudo da repetibilidade dos ensaios referente a cada fluido testado no equipamento experimental apresentam-se de seguida.

8.1.1 ÁGUA DESTILADA

As análises da repetibilidade dos ensaios realizados com água destilada, para cada conjunto de condições experimentais estabelecidas, são apresentadas nos gráficos das Figuras 8.1 a 8.11.

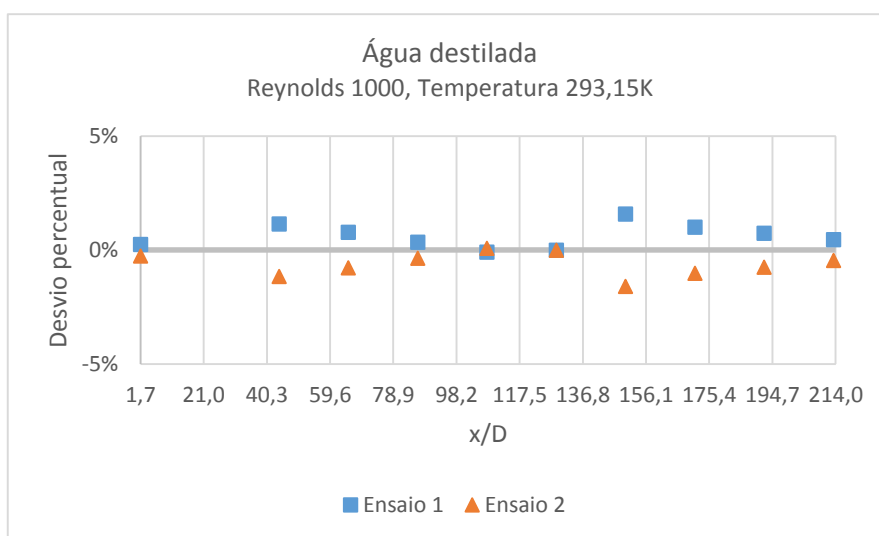


Figura 8.1 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

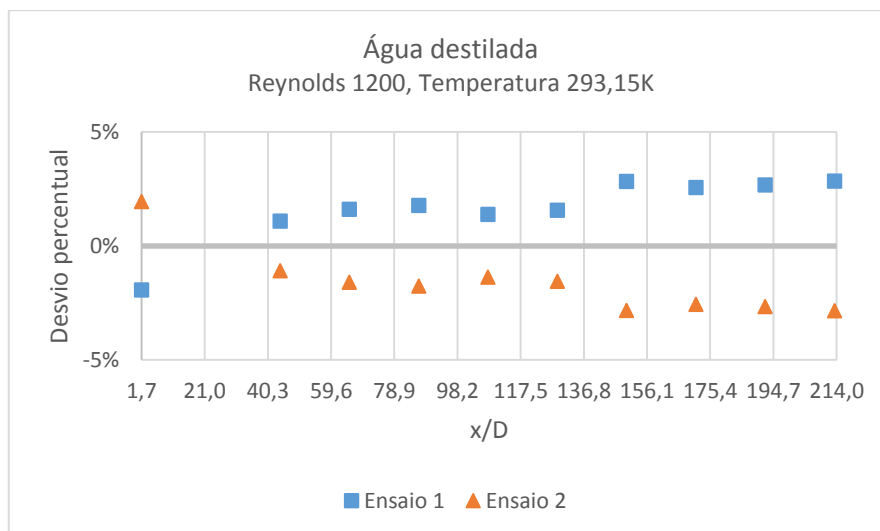


Figura 8.2 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1200, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

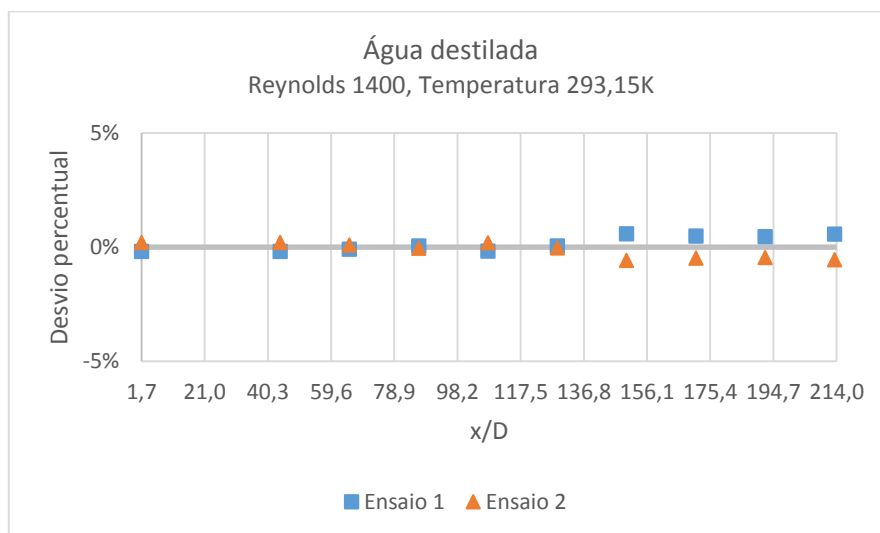


Figura 8.3 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1400, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

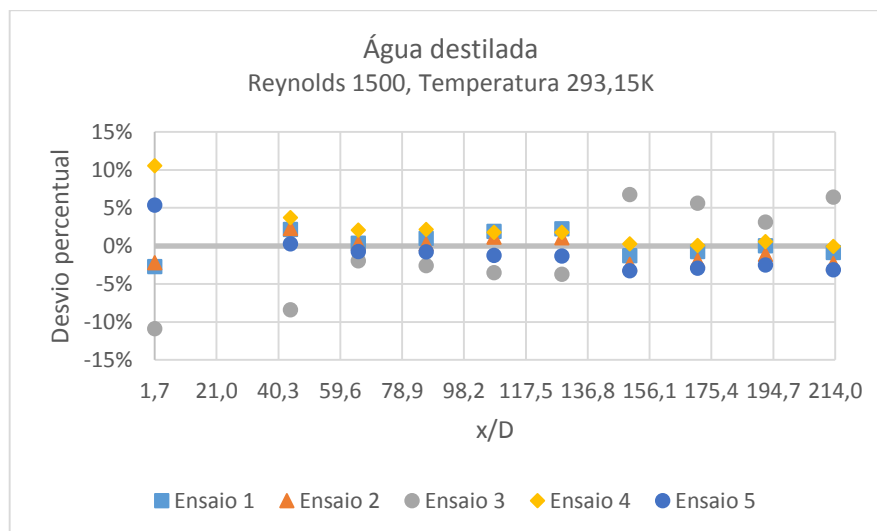


Figura 8.4 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

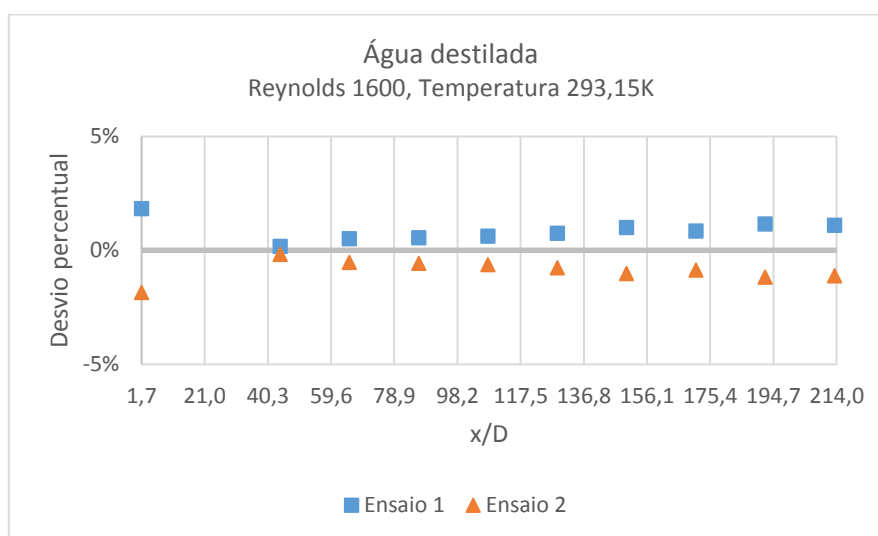


Figura 8.5 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1600, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

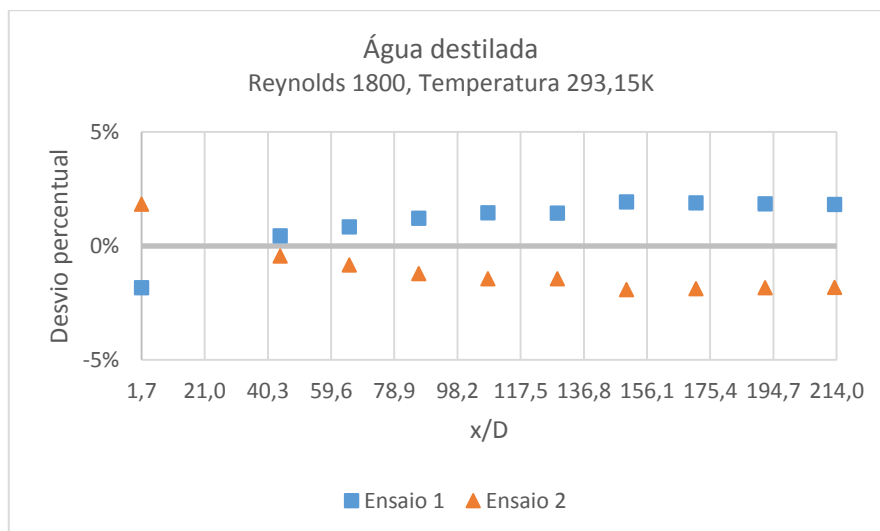


Figura 8.6 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1800, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

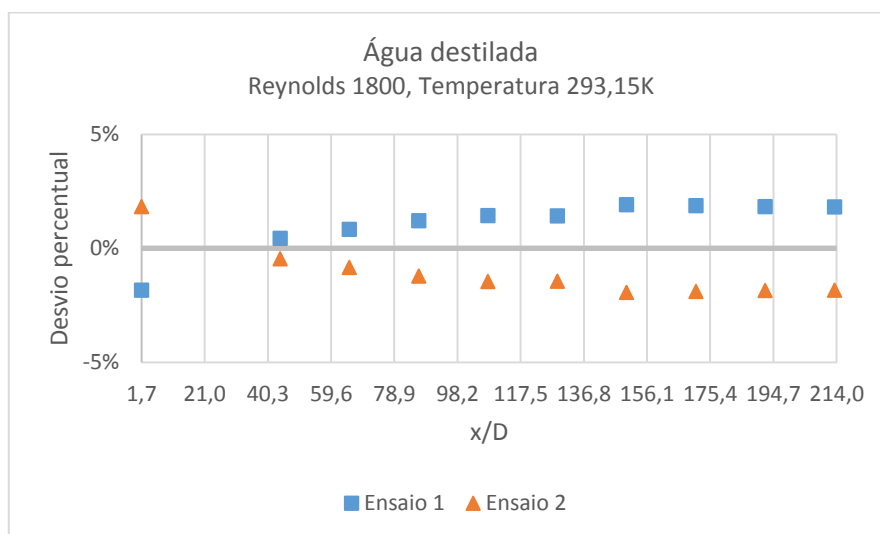


Figura 8.7 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

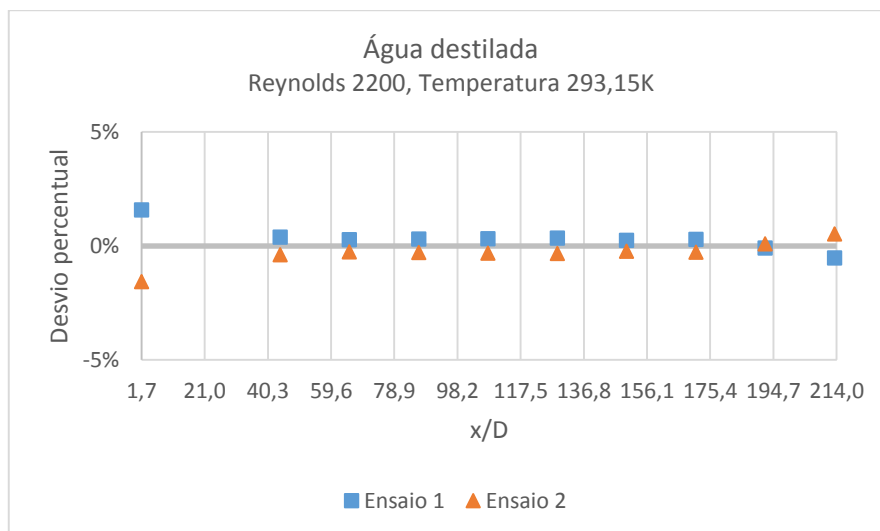


Figura 8.8 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2200, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

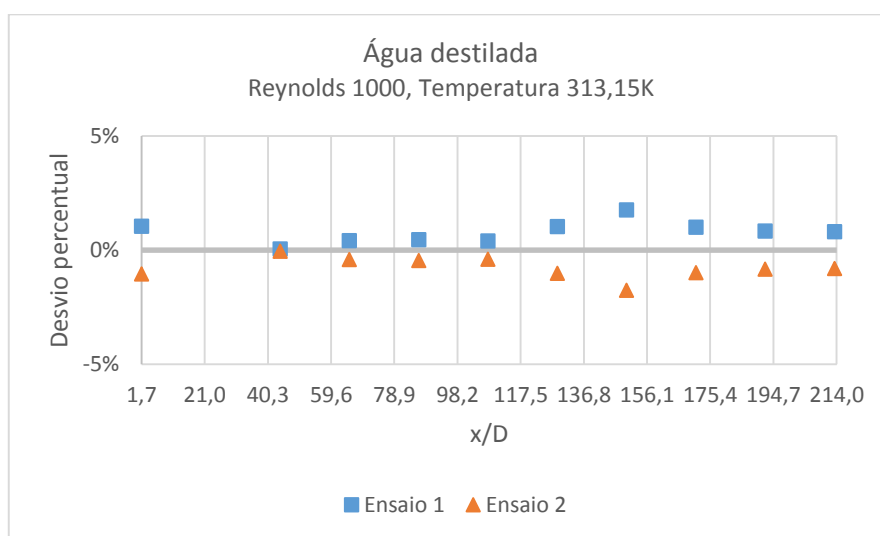


Figura 8.9 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

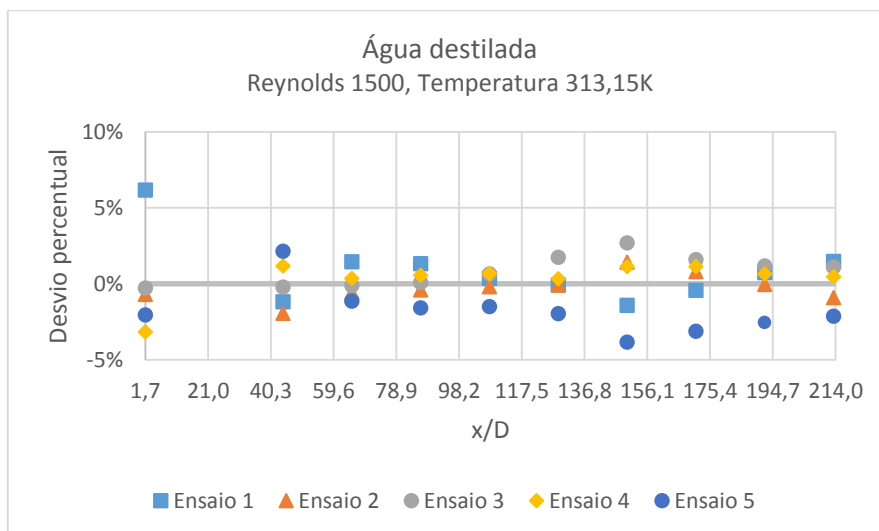


Figura 8.10 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

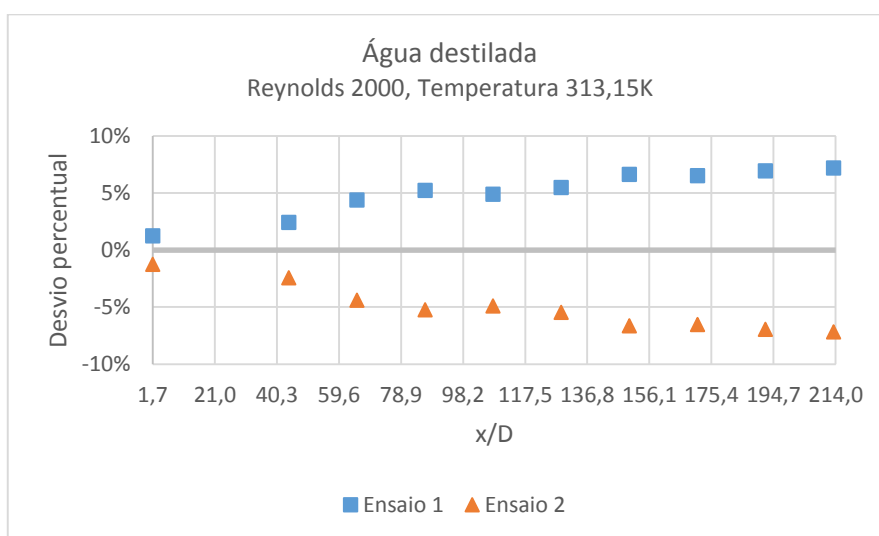


Figura 8.11 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com água destilada, à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

8.1.2 FLUIDO BASE

A mesma análise de repetibilidade foi realizada para os ensaios levados a cabo com o fluido base, uma diluição de 30% de etilenoglicol em água destilada, que se apresenta nos gráficos das Figuras 8.12 a 8.19. Nestes gráficos, o fluido base apresenta a designação 70%AD+30%EG.

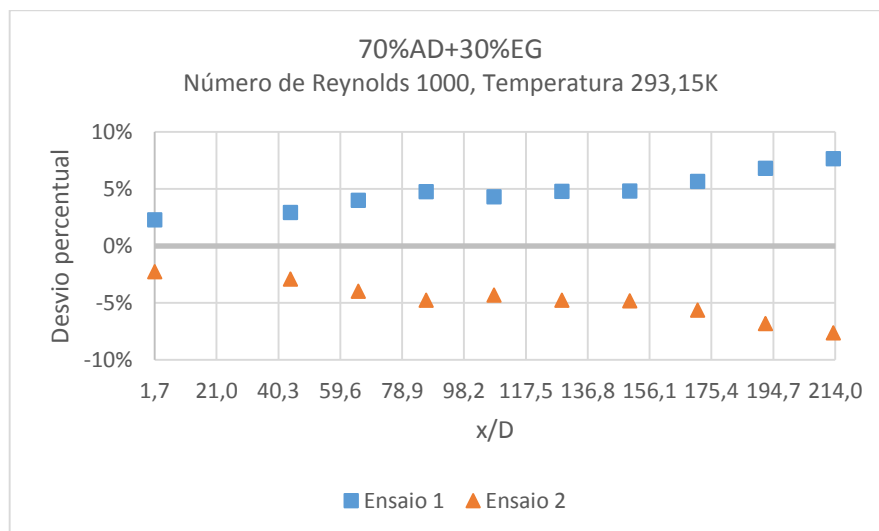


Figura 8.12 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

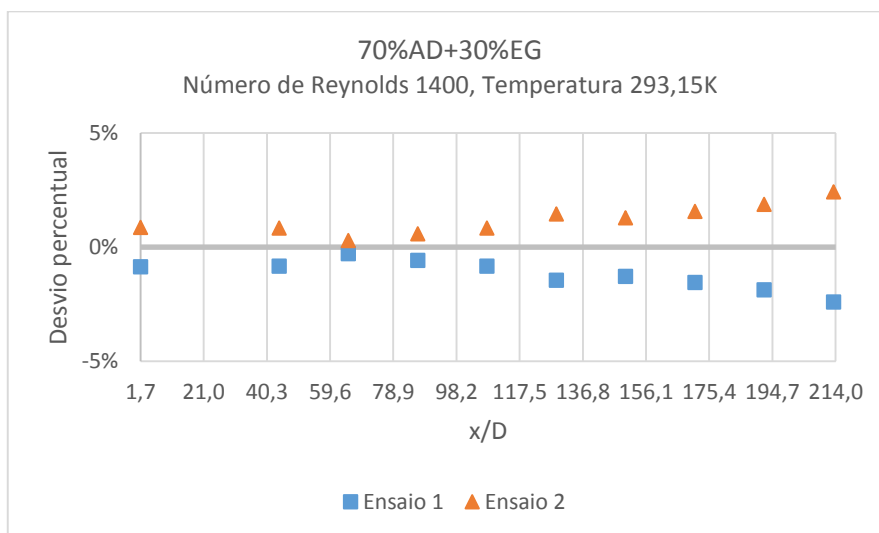


Figura 8.13 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1400, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

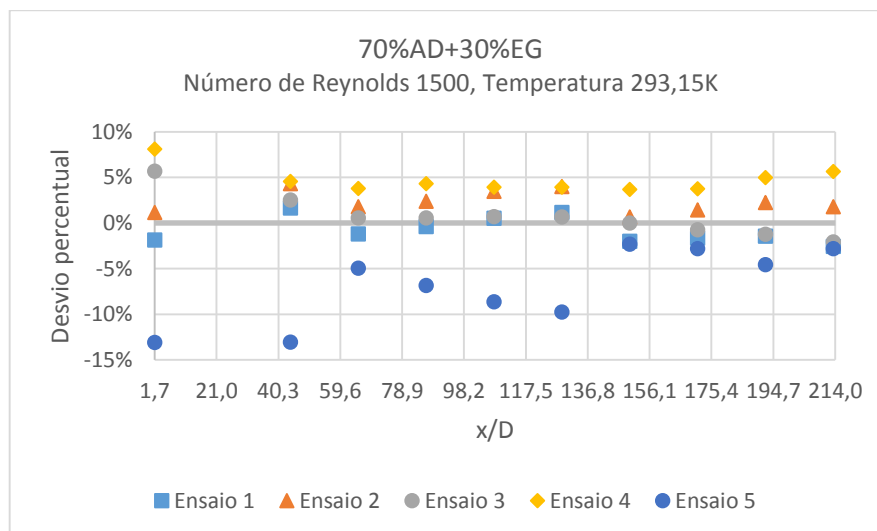


Figura 8.14 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

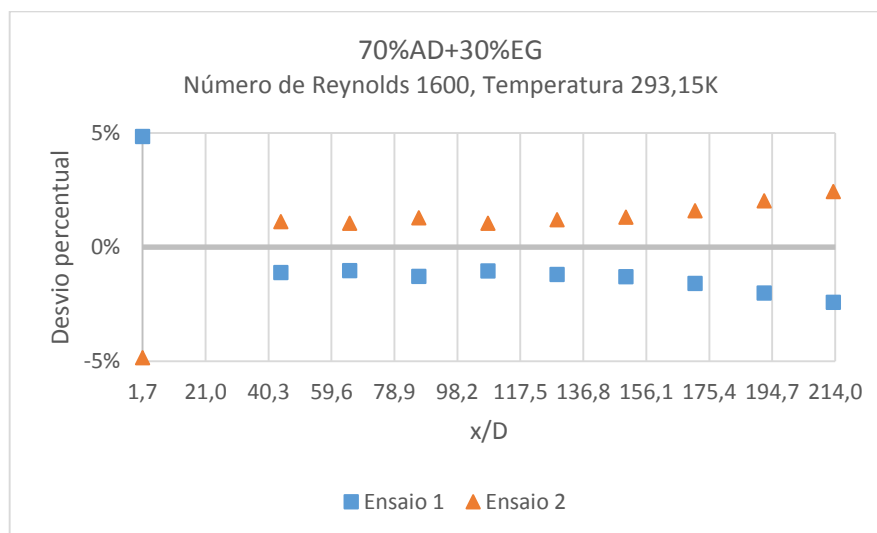


Figura 8.15 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1600, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

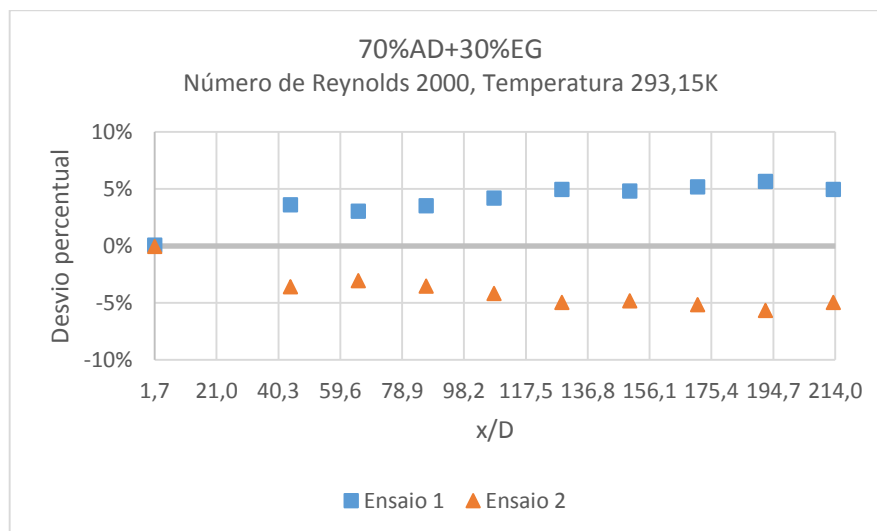


Figura 8.16 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

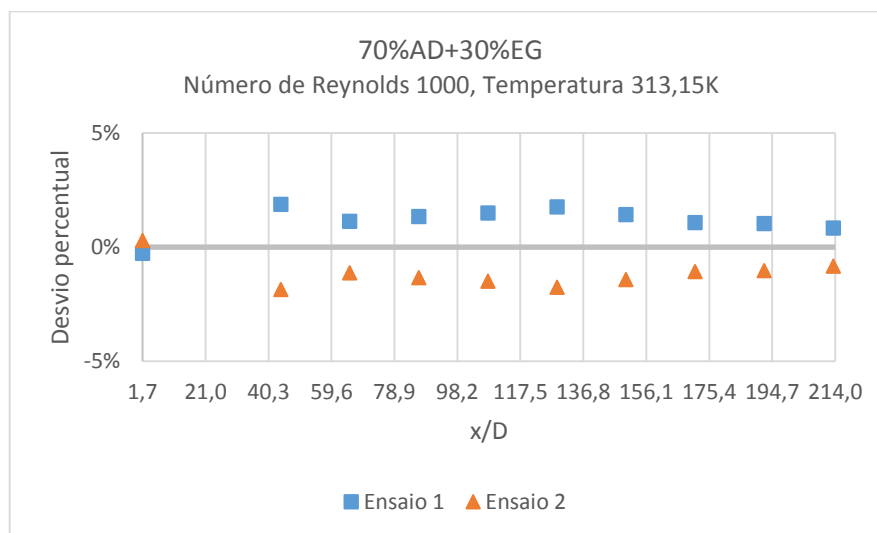


Figura 8.17 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

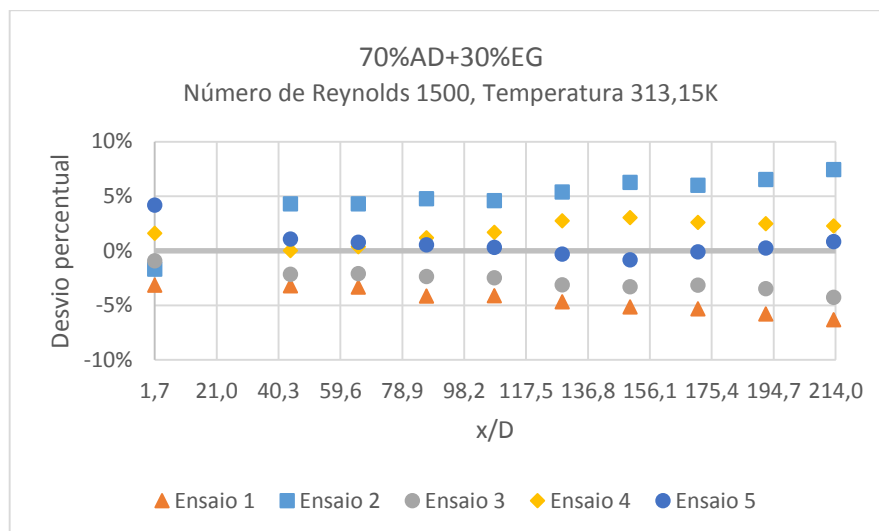


Figura 8.18 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

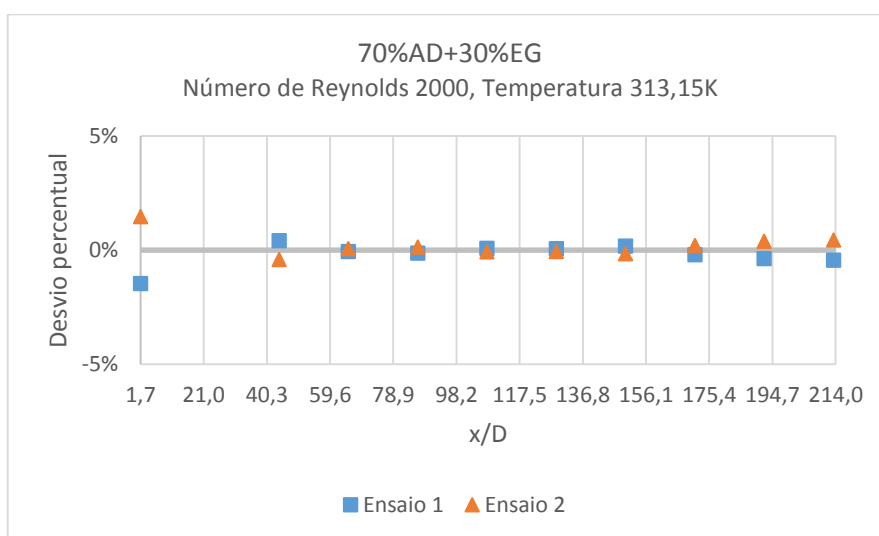


Figura 8.19 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com fluido base (70%AD+30%EG), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

8.1.3 NANOFLUIDO COM 0,25% DE MWCNT

Os gráficos da Figura 8.20 à Figura 8.27 apresentam os resultados referentes à análise de repetibilidade levada a cabo com o nanofluido com uma concentração volúmica de 0,25% de MWCNT, designado nos gráficos por NF0,25%.

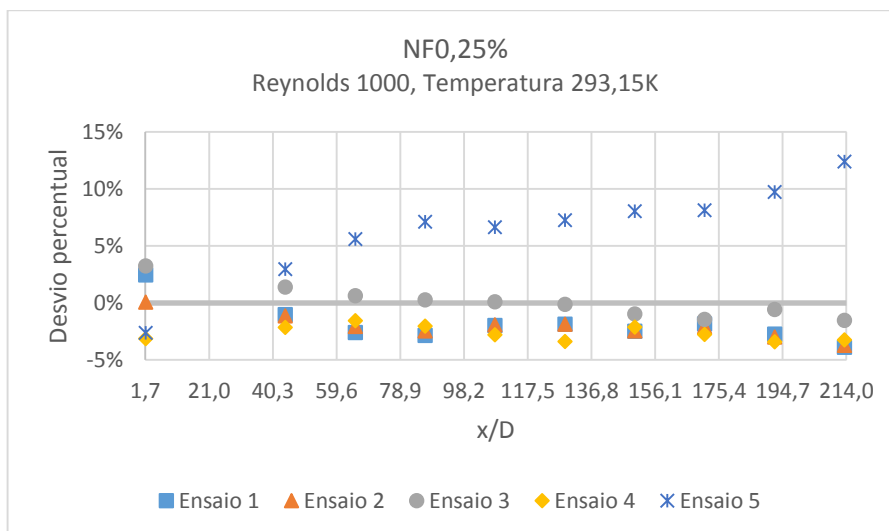


Figura 8.20 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

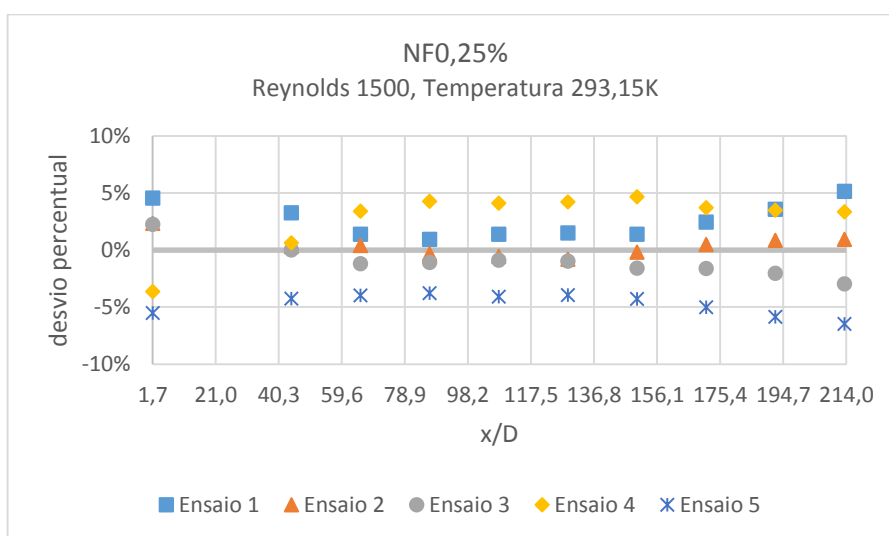


Figura 8.21 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

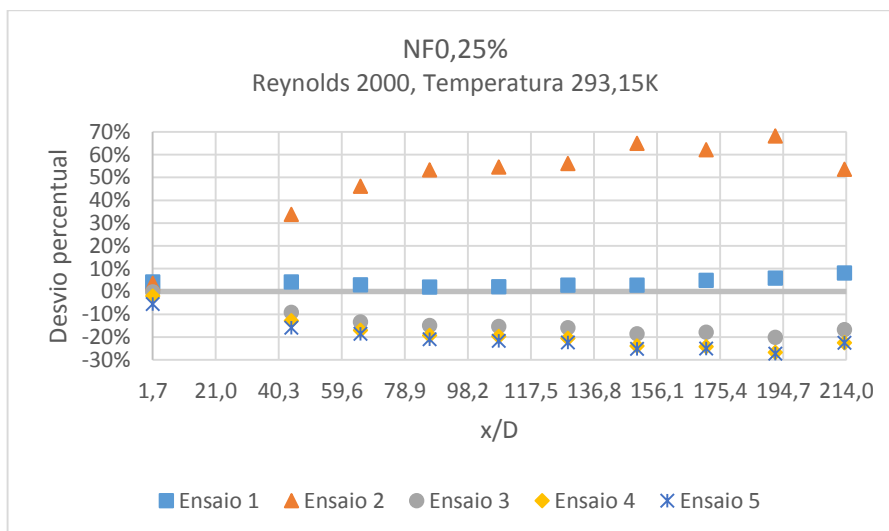


Figura 8.22

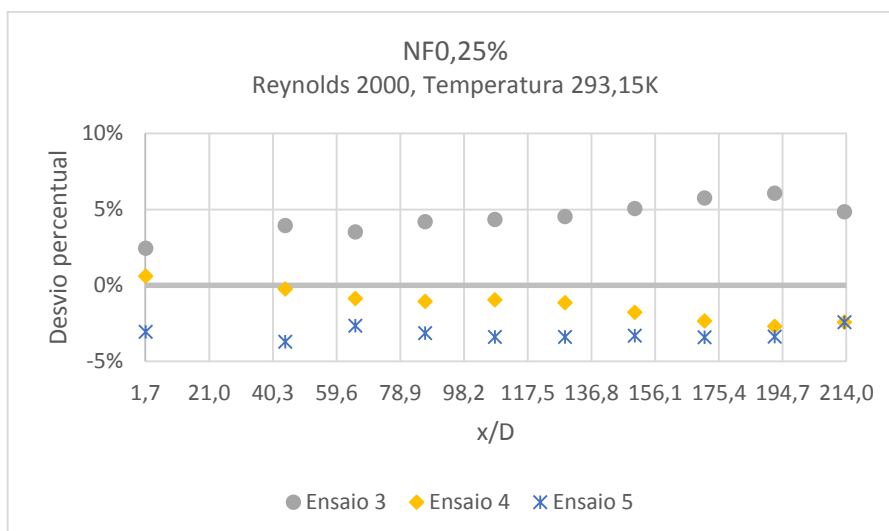


Figura 8.23 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D), após a rejeição dos ensaios com desvios superiores a 10%.

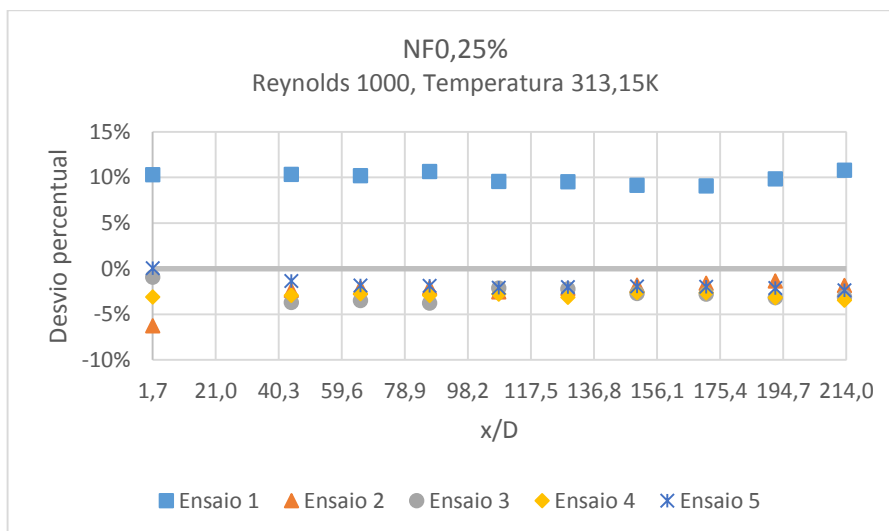


Figura 8.24 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

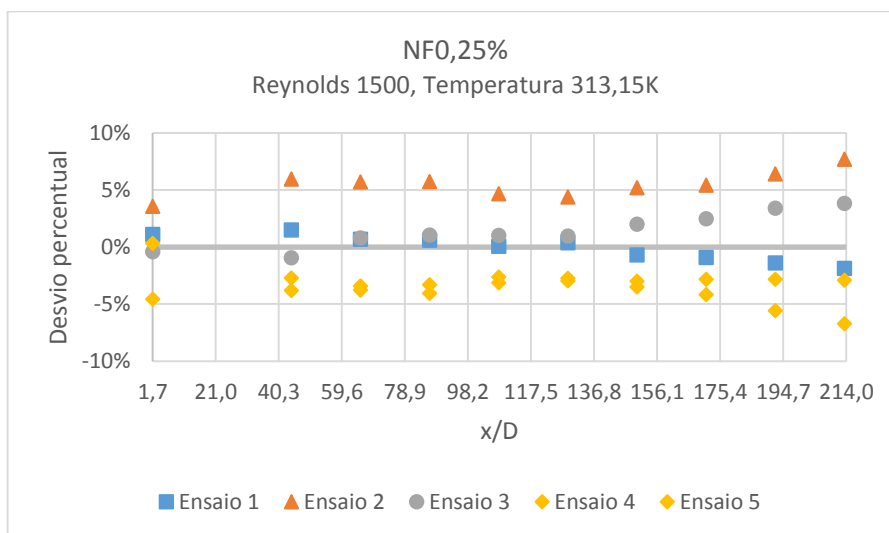


Figura 8.25 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NFO,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

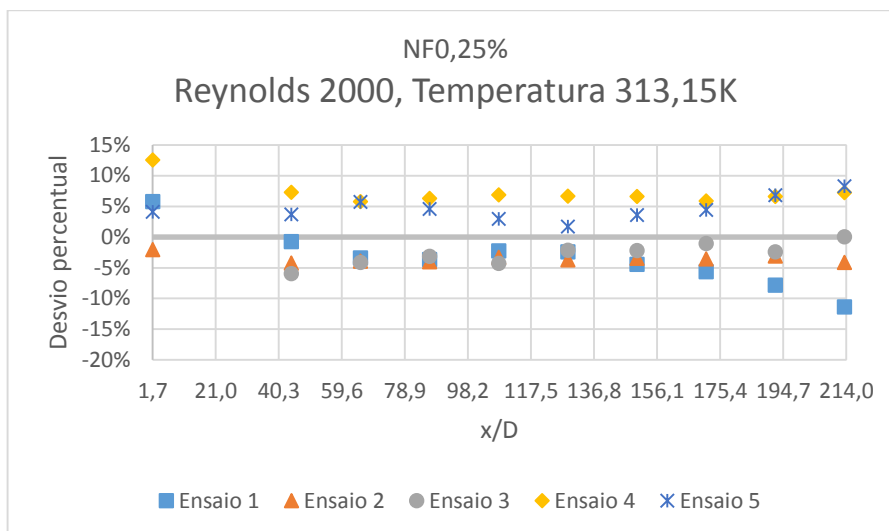


Figura 8.26 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,25% de MWCNT (NF0,25%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

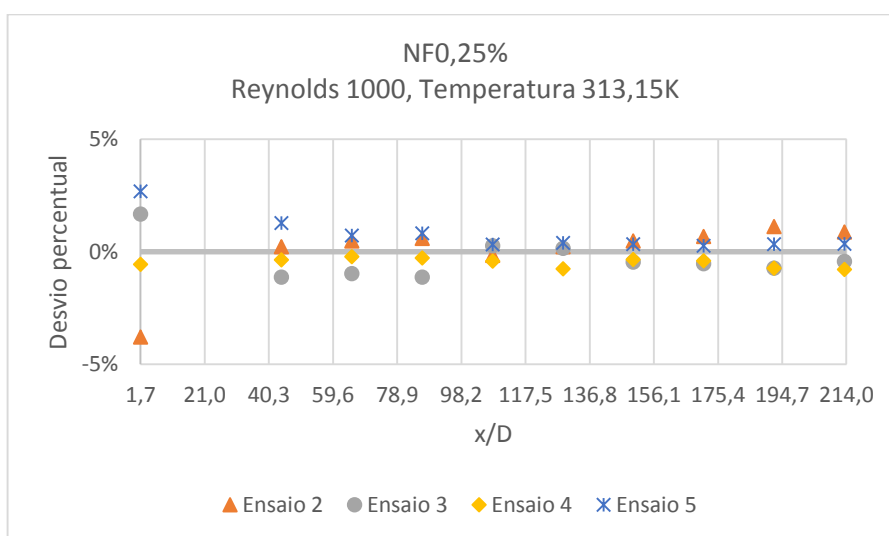


Figura 8.27

8.1.4 NANOFLUIDO COM 0,5% DE MWCNT

Os gráficos da Figura 8.28 à Figura 8.35 apresentam os resultados referentes à análise de repetibilidade realizada para o nanofluido com uma concentração volúmica de 0,5% de MWCNT, designado nos gráficos por NF0,5%.

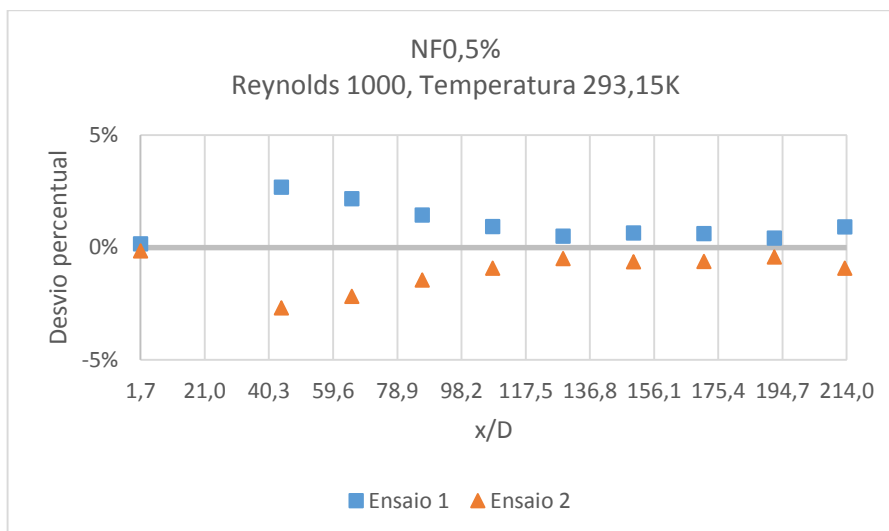


Figura 8.28 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

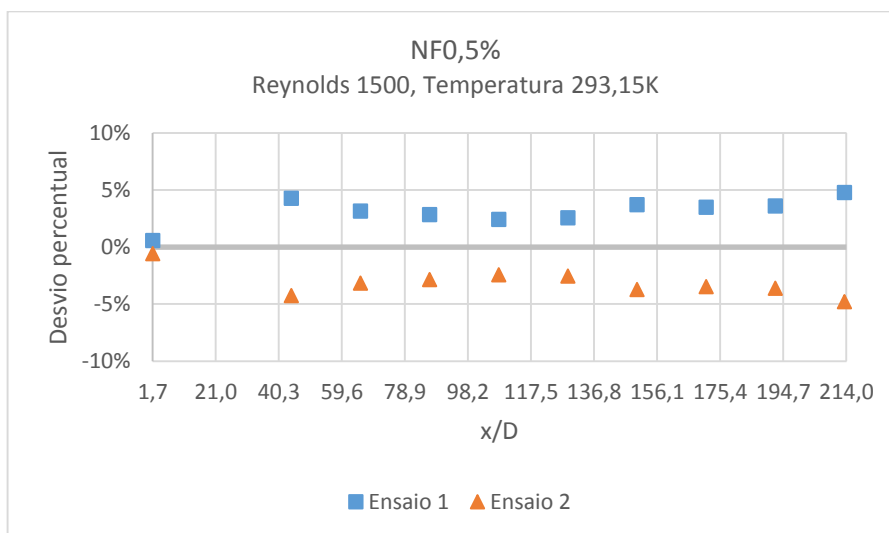


Figura 8.29 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

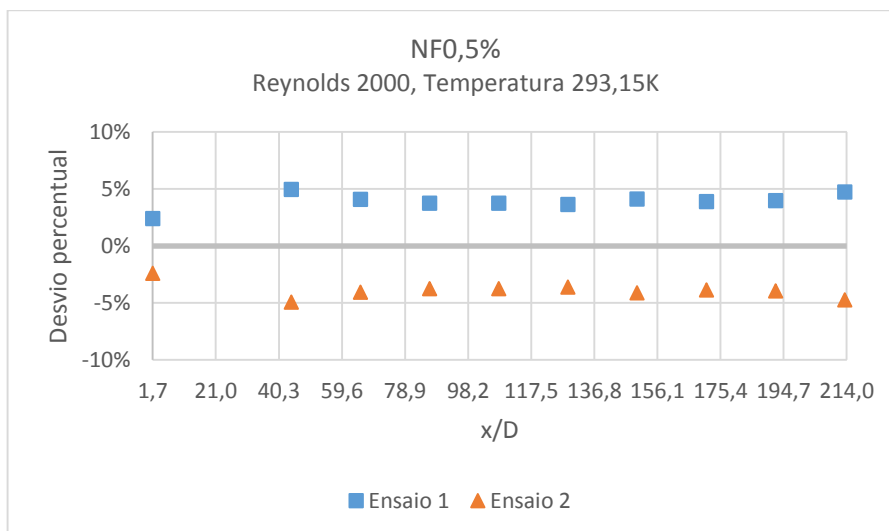


Figura 8.30 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

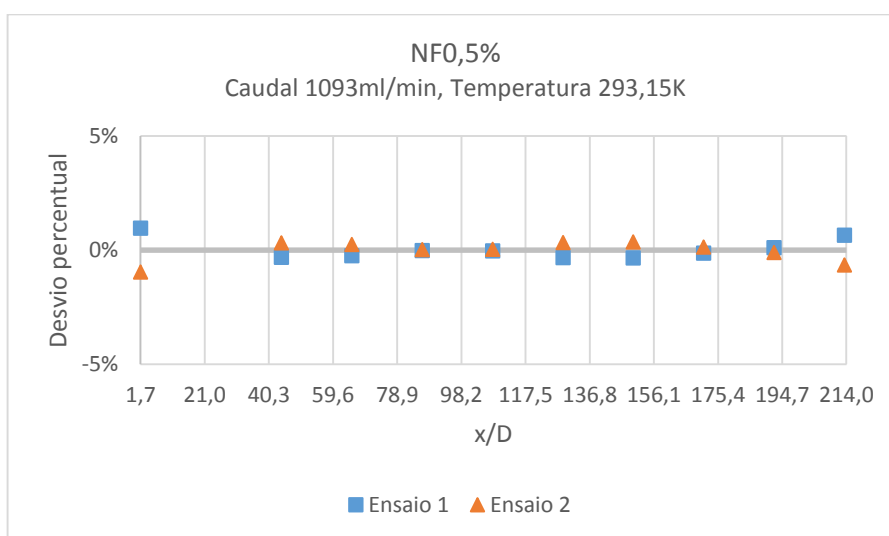


Figura 8.31 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 293,15K e escoamento com um caudal volumico de 1093ml/min, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

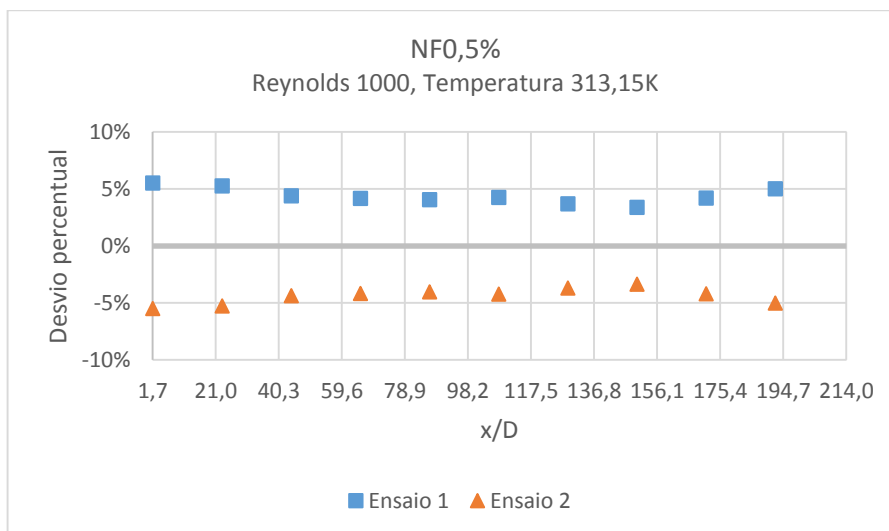


Figura 8.32 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

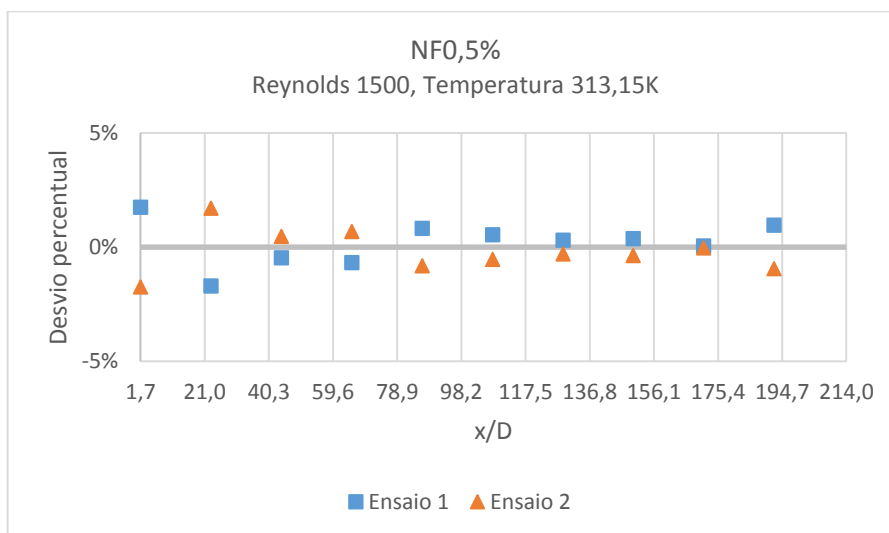


Figura 8.33 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 1500, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

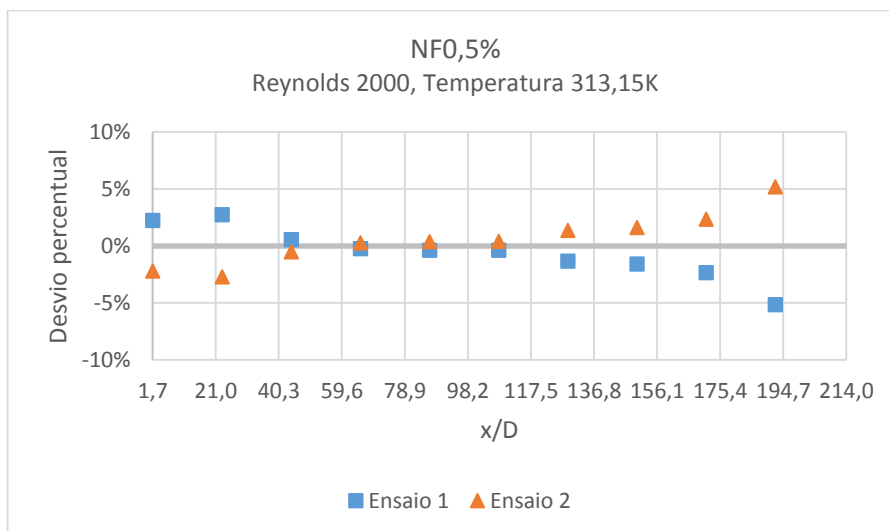


Figura 8.34 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um número de Reynolds de 2000, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

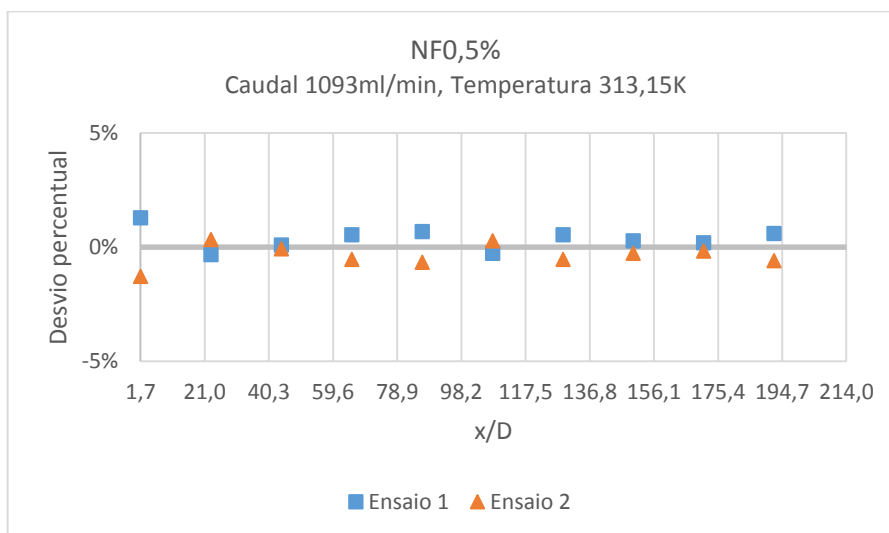


Figura 8.35 – Variação percentual do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) de cada um dos ensaios realizados com o nanofluido com 0,5% de MWCNT (NF0,5%), à temperatura de 313,15K e escoamento com um caudal volumétrico de 1093ml/min, em relação ao valor médio obtido para cada posição axial adimensional (x/D).

8.2 CARACTERIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CADA POSIÇÃO AXIAL

Os gráficos seguintes apresentam os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção em cada posição axial da tubagem, para os ensaios realizados para as diferentes condições experimentais e para os vários fluidos analisados.

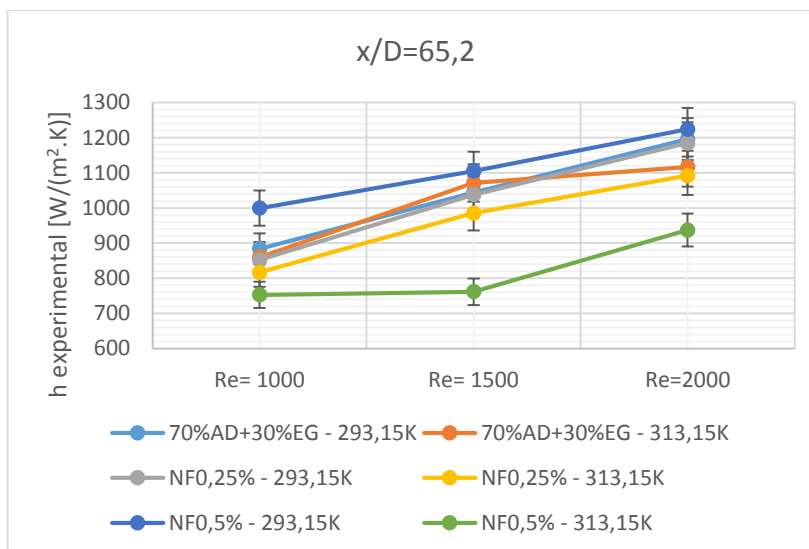


Figura 8.36- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 65,2, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

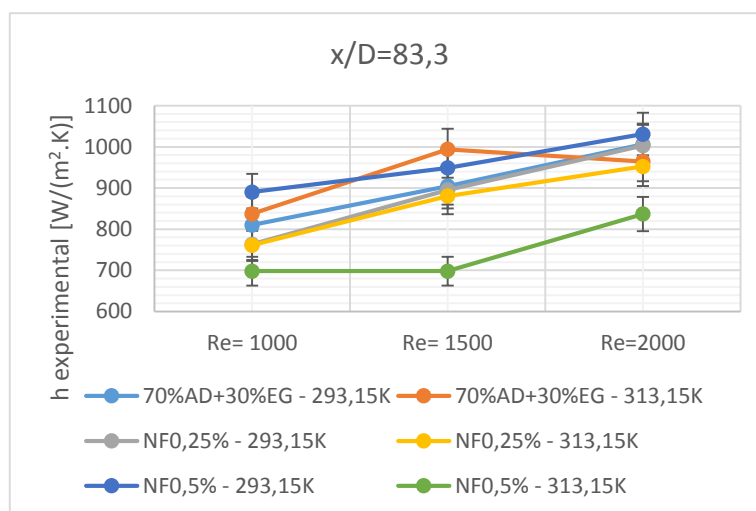


Figura 8.37- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 83,3, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

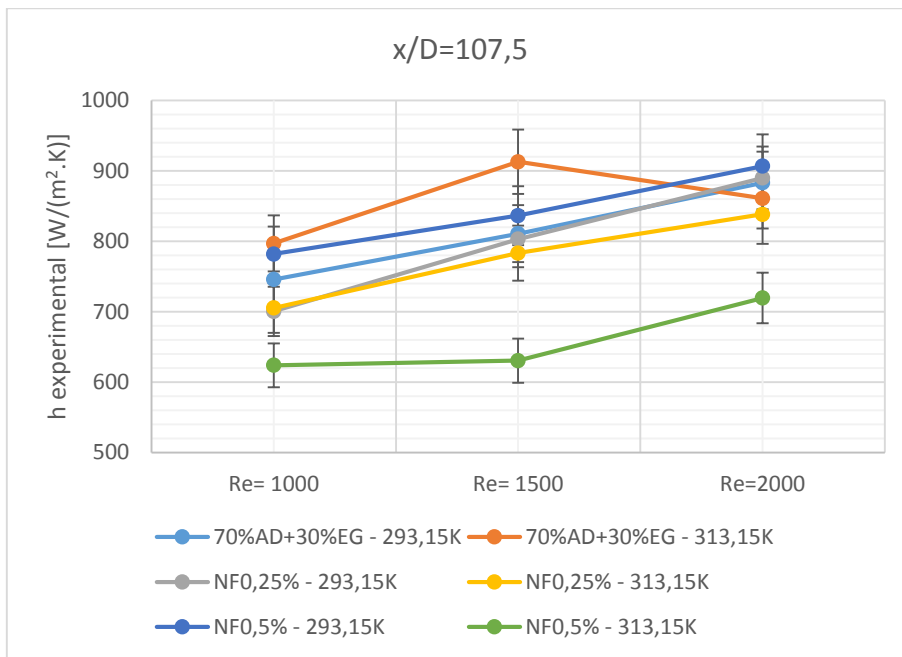


Figura 8.38- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 107,5, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

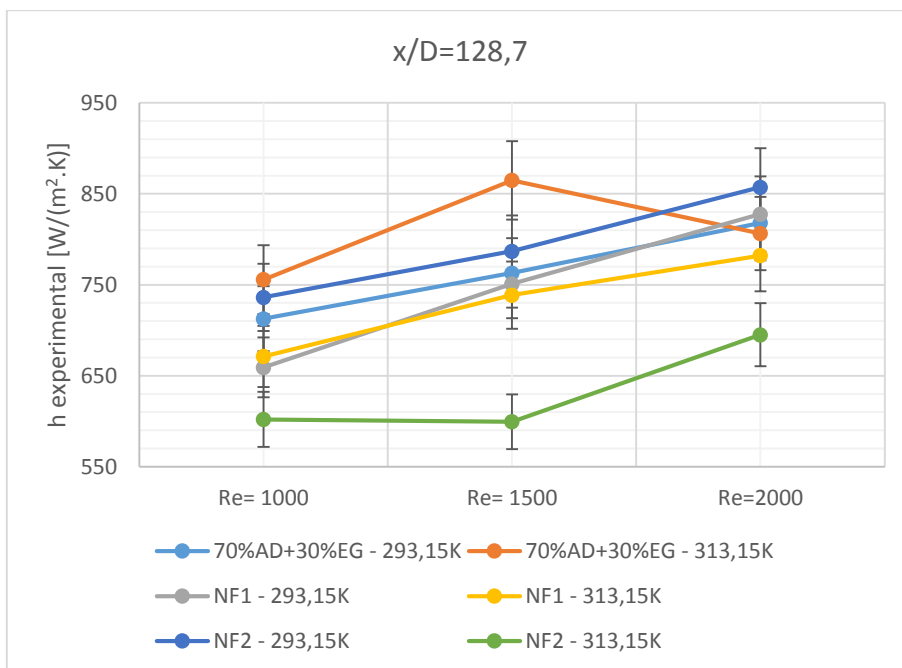


Figura 8.39- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 128,7, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

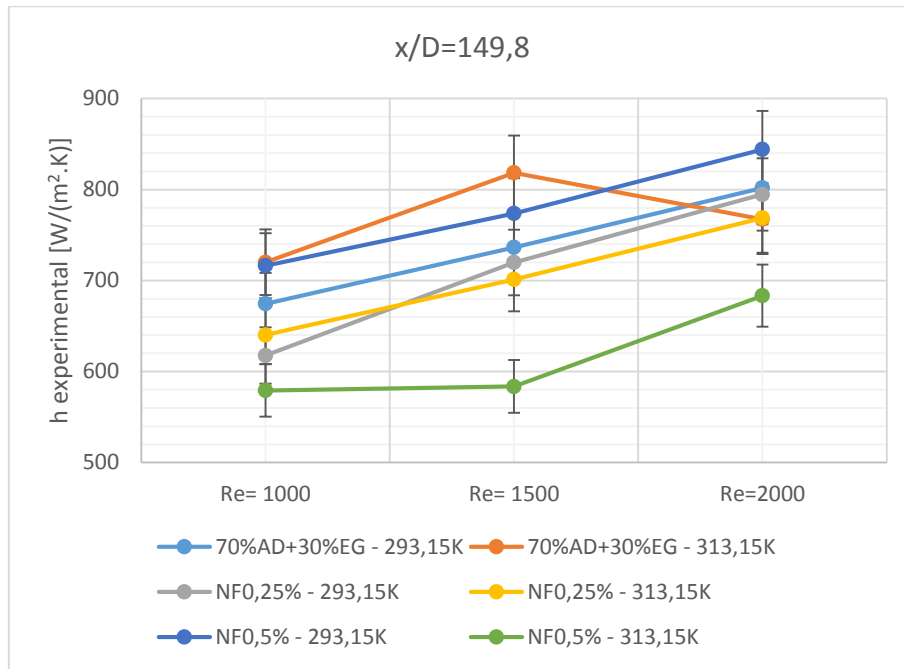


Figura 8.40- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 149,8, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

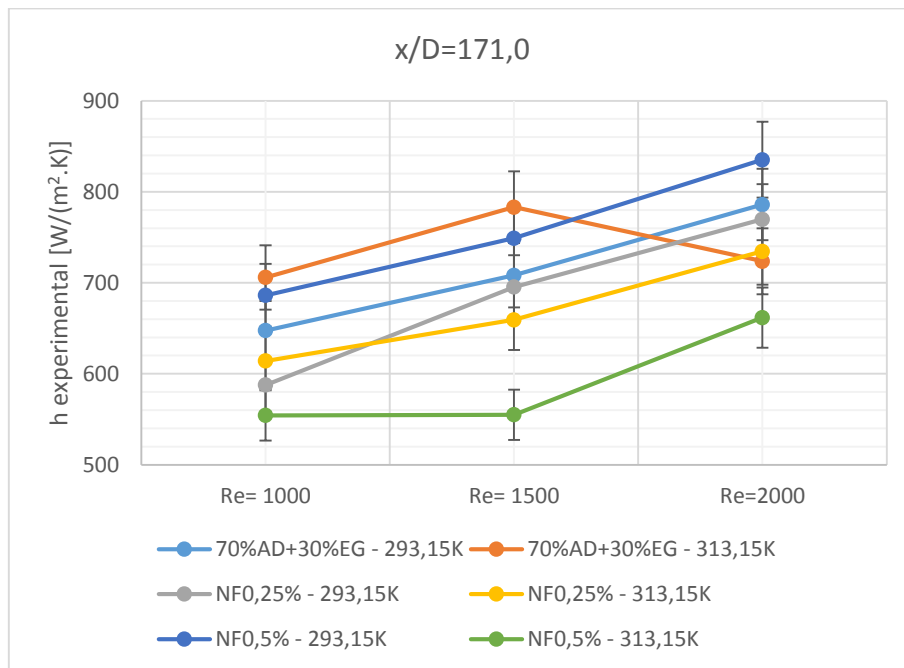


Figura 8.41- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 171,0 (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).

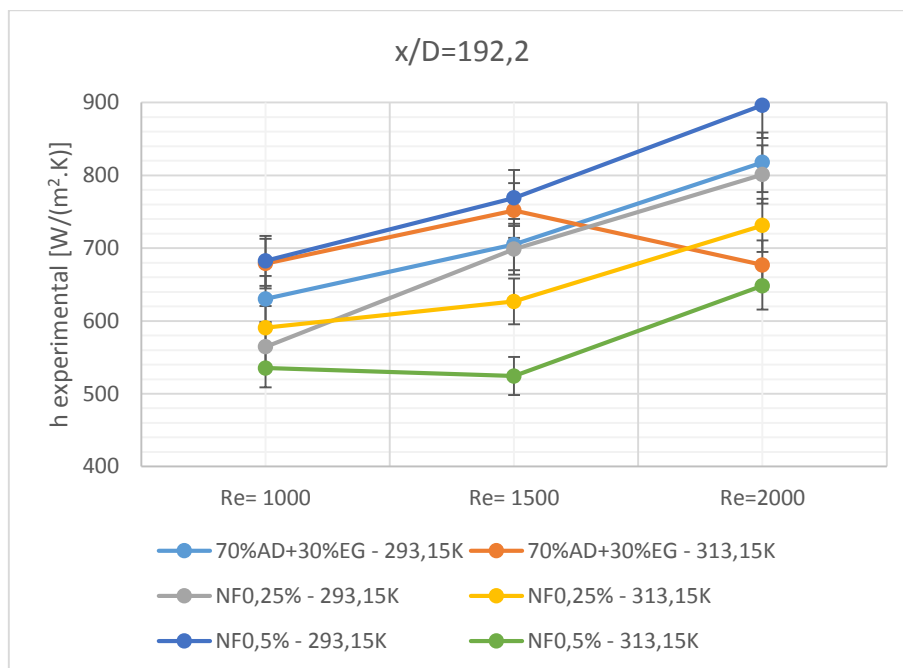


Figura 8.42- Coeficiente de transferência de calor por convecção, em função do número de Reynolds do escoamento para a posição axial adimensional (x/D) de 192.2, (70%AD+30%EG - fluido base; NF0,25% - nanofluido com 0,25% de MWCNT; NF0,5% - nanofluido com 0,5% de MWCNT).