



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2013

**Fábio Alexandre
Teixeira Fernandes**

**Caracterização da transferência de calor em
nanofluidos**



**Fábio Alexandre
Teixeira Fernandes**

Caracterização da transferência de calor em nanofluidos

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 Maria Alexandra Lopes da Fonseca, Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais José e Clara como forma da minha gratidão...

O júri

Presidente

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Hugo Miguel Filipe Calisto

Investigador da European Commission – Joint Research Centre – Institute For Energy And Transport – Energy Security Unit

Orientadora

Doutora Maria Alexandra Lopes da Fonseca

Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A realização da presente tese constitui um importante marco na minha vida académica e pessoal, pelo que gostaria de deixar os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a sua concretização.

Em primeiro lugar queria agradecer à minha orientadora Doutora Maria Alexandra Lopes da Fonseca pela sua orientação e apoio que me forneceu na elaboração da presente tese.

Quero igualmente agradecer à minha co-orientadora doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia pelo seu apoio e orientação.

Gostaria também de agradecer a todo o grupo de investigação GRIDS com quem tive o prazer de trabalhar, em especial ao Bruno Alexandre Abreu Silva por todo o apoio, dedicação e comentários construtivos que me ajudaram na otimização do aparato experimental. Queria de igual forma agradecer ao Bruno Cardoso Lamas por todo apoio e tempo que de alguma forma me ajudaram na realização da presente tese.

O meu profundo e sentido agradecimento à minha família e amigos pelo incentivo e apoio dado ao longo dos últimos anos. Aos meus pais José e Clara agradeço toda a disponibilidade, sacrifício e apoio imprescindível.

Palavras-chave

Nanofluidos, nanotubos de carbono, propriedades termo-físicas, condutividade térmica, e coeficiente de transferência de calor por convecção

Resumo

A transferência de energia sob a forma de calor é um processo indispensável a uma variedade de indústrias, desde a eletrônica à alimentar. Frequentemente, estes tipos de sistemas energéticos dependem de fluidos para promoverem a transferência de calor, tais como a água, o etileno-glicol ou óleos. Contudo, estes fluidos convencionais apresentam propriedades termo-físicas pobres, limitando o desenvolvimento de sistemas térmicos sustentáveis, bem como a sua miniaturização. Com o intuito de melhorar as propriedades termo-físicas de fluidos de permuta, dispersou-se nanotubos de carbono num fluido convencional (30:70 Etileno-glicol/Água). Estas dispersões são designadas de nanofluidos. Para o estudo da transferência de calor dos nanofluidos produzidos, otimizou-se um aparato experimental dedicado a estudo dos fenómenos de transferência de calor por convecção. Neste aparato, os nanofluidos foram estudados a diferentes taxas de escoamentos, num tubo circular sujeito a um fluxo de calor superficial constante. As relações entre as diferentes variáveis como: propriedades termofísicas, fração volumétrica, temperatura e velocidade de escoamento são, assim objeto de estudo detalhado nesta dissertação. Os resultados experimentais sugerem que os nanofluidos permitem taxas de transferência de calor por convecção superiores, quando comparadas com o fluido base. Assim, a dispersão de nanopartículas em fluidos de permuta convencionais, permite o desenvolvimento de sistemas energéticos sustentáveis.

Keywords

Nanofluids, carbon nanotubes, thermo physical properties, thermal conductivity, convection heat transfer coefficient.

Abstract

The heat transfer is an essential process to a wide range of industries, from electronics to food production. Often, these types of energy systems rely on fluids to promote the heat transfer, such as water, ethylene glycol or oils. However, these conventional fluids usually have poor thermo-physical properties, limiting the sustainable development of such thermal systems, as well as their miniaturization. In order to improve the thermo-physical properties of heat-exchange fluids, it was dispersed carbon nanotubes in a conventional fluid (Ethylene glycol/Water 30:70). These dispersions are designated as nanofluids. To study the heat transfer of the produced nanofluids, it was optimized a dedicated experimental apparatus to study the phenomena of convection heat transfer. In such apparatus, the nanofluids were studied at different flow rates, in a circular tube subjected to a constant heat flux. The relationships between the different variables such as: thermo-physical properties, volume fraction of the nanoparticles, temperature and flow rate are, therefore, main studying factors in this dissertation. The experimental results suggest that nanofluids allow a superior exchange heat transfer through convection, when compared with the base fluids. Therefore, the dispersion of nanoparticles in conventional heat-exchange fluid enables the development of more sustainable energy systems.

Índice

ÍNDICE	I
ÍNDICE FIGURAS	III
ÍNDICE TABELAS	VII
NOMENCLATURA	IX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1- MOTIVAÇÃO.....	1
1.2- OBJETIVOS.....	1
1.3- INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1- PREPARAÇÃO DE NANOFUIDOS.....	5
2.2- ESTABILIDADE DE NANOFUIDOS.....	6
2.3- PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DOS NANOFUIDOS.....	8
2.4- VISCOSIDADE DOS NANOFUIDOS.....	11
2.5- CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS NANOFUIDOS.....	13
2.6- TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO DE NANOFUIDOS.....	15
CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DOS NANOFUIDOS	21
3.1- MATERIAL.....	21
3.2- PREPARAÇÃO DE NANOFUIDOS.....	23
3.3- ESTUDO DA ESTABILIDADE DOS NANOFUIDOS.....	24
3.4- CARACTERIZAÇÃO DOS NANOFUIDOS.....	25
CAPÍTULO 4 - OTIMIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DA BANCADA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	29
4.1- APARATO EXPERIMENTAL.....	29
4.2- METODOLOGIA.....	33
4.3- DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DO APARATO EXPERIMENTAL.....	34
4.4- CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL.....	37
4.5- QUANTIFICAÇÃO DA INERCIA TÉRMICA DE CONDUÇÃO.....	43
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM NANOFUIDOS	47
5.1- COMPARAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS PARA DIFERENTES POSIÇÕES AXIAIS.....	47
5.2- COMPARAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	49
5.3- COMPARAÇÃO DOS VALORES EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS DO NÚMERO DE NUSSELT.....	52
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	55
BIBLIOGRAFIA	57
ANEXOS	65

Índice Figuras

Figura 1 - Espectroscopia de FTIR de MWCNTs.	22
Figura 2 - Imagens de microscopia eletrônica de varrimento, dos MWCNT's (a) antes do tratamento e (b) após tratamento químico.	23
Figura 3 - Estudo da estabilidade do nanofluido compostos por (30:70) EG/AD e MWCNTs (D= 20-40nm e L=10-30nm), (a) Velocidade de Sedimentação e (b) tempo de vida útil (Lamas et al. 2013).	24
Figura 4 - Aparato experimental utilizado para medir experimentalmente a condutividade térmica.	26
Figura 5 - Condutividade Térmica dos diferentes fluidos em função da temperatura.	26
Figura 6 - Viscosidade dos diferentes fluidos em função da temperatura.	27
Figura 7 - Desenho esquemático do novo aparato experimental do sistema de transferência de calor por convecção.	31
Figura 8 - Fotografia do aparato experimental.	32
Figura 9 - Valores experimentais adquiridos pelos termopares quando sujeitos a diferentes temperaturas.	37
Figura 10 - Temperatura adquiridas pelos termopares devidamente posicionados ao longo do tubo (no aparato experimental).	38
Figura 11 - Temperaturas adquiridas para os termopares posicionados ao longo do tubo para diferentes números de Reynolds, sem fluxo de calor.	39
Figura 12 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para Re=2000.	42
Figura 13 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, com Re= 2000.	43
Figura 14 - Representação da resistência térmica entre o termopar e o caudal.	44

Figura 15 - Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial, para $Re=2000$, após correção da inércia térmica de condução.	45
Figura 16 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base, para distâncias axiais de $x/D=23$ (a) e $x/D=171$ (b) em função do número de Reynolds.	48
Figura 17 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=192$	49
Figura 18 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=2000$	50
Figura 19 - Coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação ao fluido em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=192$;	51
Figura 20 - Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=2000$	52
Figura 21 - Número de Nusselt para os nanofluidos de 0,25% vol MWCNT (a) e 0,50% vol MWCNT (b) em função da distância axial, para $Re=2000$	53
Figura A.1 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1000$	67
Figura A. 2 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1200$	68
Figura A. 3 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1400$	69
Figura A. 4 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1600$	70
Figura A. 5 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1800$	71

Figura A. 6 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, para $Re=1000$ (a), $Re=1200$ (b) e $Re=1400$ (c).....	72
Figura A. 7 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, para $Re=1600$ (a) e $Re=1800$ (b).	73
Figura A. 8 - Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial, após correção da inércia térmica de condução, para diferentes números de Reynolds.	74
Figura A. 9 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=150$ (a), $x/D=44$ (b) e $x/D=65$ (c).	75
Figura A. 10 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=1000$ (a), $Re=1200$ (b) e $Re=1400$ (c).	76
Figura A. 11 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=1600$ (a) e $Re=1800$ (b).	77
Figura A. 12 - Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=1000$ (a), $Re=1200$ (b) e $Re=1400$ (c).	78
Figura A. 13 - Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=1600$ (a) e $Re=1800$ (b).	79
Figura A. 14 - Número de Nusselt para os nanofluidos de 0,25%vol MWCNT em função da distância axial, para diferentes números de Reynolds.	80
Figura A. 15 - Número de Nusselt para os nanofluidos de e 0,50%vol MWCNT (b) em função da distância axial, para diferentes números de Reynolds.	81

Índice Tabelas

Tabela 1 - Sumário dos principais estudos sobre a estabilidade coloidal de fluidos com MWCNTs.....	8
Tabela 2 - Sumário de algumas correlações existentes para determinação da viscosidade.	12
Tabela 3 - Sumário de alguns resultados empíricos da condutiva térmica de nanofluidos.	14
Tabela 4 - Sumário de algumas correlações existentes para determinação da condutividade térmica.....	15
Tabela 5 - Sumário de alguns resultados empíricos do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos.....	18
Tabela 6 - Sumário para algumas correlações existentes para a determinação do número de Nusselt de nanofluidos.....	19
Tabela 7 - Especificações dos nanotubos de carbono de múltiplas paredes utilizados no trabalho experimental.....	21
Tabela 8 - Resumo propriedades termo – físicas dos fluidos de teste a 293 K.....	28
Tabela 9 – Resumo das propriedades inertes ao calculo do comprimento mínimo do permutador de calor.....	30
Tabela 10 - Alterações efetuadas para a otimização do aparato experimental.....	33
Tabela 11 - Incertezas dos equipamentos de medida do aparato experimental.....	34
Tabela 12 - Erro teórico do aparato experimental para o coeficiente de transferência de calor por convecção para os diferentes termopares em função do número de Reynolds.....	36
Tabela 13- Variação das temperaturas experimentais para diferentes números de Reynolds.....	41
Tabela A.1- Erro experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção para os diferentes termopares em função do número de Reynolds.....	66

Nomenclatura

Φ	Fração volúmica
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade
Pr	Número de Prandtl
Nu	Número de Nusselt
h	Coefficiente de transferência de calor
k	Condutividade térmica
Re	Número de Reynolds
x	Distância axial
c_p	Calor específico
\dot{m}	Caudal mássico
Q	Caudal volumétrico
v	Velocidade de escoamento
R_t	Resistência térmica
q	Taxa de transferência de calor
q''	Fluxo de calor
T_s	Temperatura de superfície
T_m	Temperatura fluido
$T_{sup-int}$	Temperatura superfície interna
D_i	Diâmetro interno
L	Comprimento do tubo
P	Perímetro
A	Área
MWCNT	Nanotubos de carbono de múltiplas paredes
CNT	Nanotubos de carbono
EG	Etileno-glicol

<i>AD</i>	Água destilada
<i>fb</i>	Fluido base
<i>p</i>	Partícula
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>exp</i>	Experimental
<i>teo</i>	Teórico
<i>Out</i>	Saída
<i>In</i>	Entrada
<i>Sup</i>	Superfície
<i>vol</i>	Volume

Capítulo 1 - Introdução

1.1- Motivação

Na última década os nanofluidos têm atraído muito interesse não só por parte da comunidade acadêmica, mas também por parte da indústria. O seu elevado desempenho térmico e as diversas potencialidades de aplicação levam a que este inovador fluido seja classificado como a próxima geração de fluidos de permuta. O presente estudo surge no seguimento do trabalho que o GRIDS tem vindo a desenvolver na área de transferência de calor em novos fluidos de permuta de calor, como o caso de nanofluidos (fluidos de base convencionais reforçados com nanotubos de carbono).

1.2- Objetivos

No seguimento da investigação levado a cabo pelo GRIDS, a presente tese prende-se com a otimização de uma bancada de transferência de calor, previamente desenvolvida. Conjuntamente pretende-se adquirir todo o conhecimento relacionado com a metodologia inerente à preparação e caracterização das propriedades termo-físicas dos diferentes fluidos de permuta.

1.3- Introdução

Fluidos de transferência de calor, tais como água, óleo mineral e etileno - glicol são de extrema importância em muitos processos industriais. As fracas propriedades térmicas dos fluidos convencionais, comparativamente com a dos metais, impossibilitam o desenvolvimento de permutadores de calor mais compactos e energeticamente eficientes.

O desenvolvimento de suspensões de partículas sólidas em líquidos surge no século XIX, contudo somente com desenvolvimento da nanotecnologia é que foi possível despoletar outros fluidos de permuta. Em 1995, Choi et al. (1995) foi um dos pioneiros em misturar nanopartículas de metal sólidas em líquidos, denominando esta mistura de nanofluidos. O termo nanofluido é utilizado para descrever suspensões de partículas de tamanho nanométrico, geralmente inferior a 100 nm dispersas num fluido base, tais como a água, etileno-glicol, óleo e outros fluidos. A adição de nanopartículas de metal com elevada condutividade térmica como (alumina, óxido de cobre e CNT), ao fluido base, induz um

aumento na condutividade térmica do fluido base, melhorando desta forma a sua capacidade de transferência de calor.

A necessidade de produção de fluidos com propriedades térmicas superiores, associado à necessidade de otimizar a eficiência dos equipamentos de permuta convencionais, promoveu o desenvolvimento e investigação de novos fluidos de permuta, entre os quais os nanofluidos. Estes, apresentam inúmeras possibilidades de aplicação desde o arrefecimento de equipamentos eletrônicos (ex. computadores, servidores, máquinas de raio-X, etc...), à indústria alimentar, militar e aeronáutica. A aplicabilidade dos nanofluidos na indústria solar térmica e fotovoltaica também tem despertado bastante interesse, devido à capacidade dos nanofluidos em absorver a radiação solar.

A otimização dos equipamentos de permuta está sempre dependente de três fatores:

- Área de transferência de calor
- Gradiente de temperaturas
- Coeficiente de transferência de calor do fluido operante

O aumento da área de transferência de calor é uma estratégia comum para melhorar a eficiência dos permutadores de calor. Contudo, em situações em que o tamanho e o peso é um requisito, este tipo de otimização não é viável.

A alteração do gradiente de temperaturas apenas permite tornar a transferência de calor mais eficiente, tornando se uma desvantagem devido ao facto de requer mais energia para o funcionamento do equipamento.

O aumento do coeficiente de transferência de calor do fluido operante, apresenta-se como uma das soluções mais viáveis para a otimização dos equipamentos de permuta. A substituição dos fluidos de permuta convencionais por nanofluidos, é esperado que potencie a eficiência deste tipo de equipamentos.

Contudo, são inúmeros os equipamentos e aplicações os quais os nanofluidos podem ser utilizados como por exemplo:

- Arrefecimento de mecanismos mecânicos
- Caldeira de recuperação de exaustão de gases de combustão
- Aquecimento e arrefecimento de edifícios
- Arrefecimento de componentes eletrônicos
- Aquecimento solar de água
- Refrigeração (frigoríficos, *chillers*)
- Indústria militar
- Indústria aeroespacial
- Aplicações biomédicas

Apesar dos inúmeros estudos já realizados sobre esta temática, ainda existe uma grande discussão sobre os mecanismos responsáveis pela transferência de calor nos nanofluidos. (Saidur et al. (2011))

Os nanotubos de carbono (CNT) têm vindo a ser utilizado como partículas de reforço, um grande interesse por parte dos investigadores, devido às suas extraordinárias propriedades térmicas, mecânicas e elétricas. Assim no presente trabalho são produzidas suspensões de nanotubos de carbono, num fluido base para posterior caracterização da capacidade de transferência de calor por convecção.

O trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo é dedicado a uma breve introdução ao tema dos nanofluidos. No capítulo dois faz – se uma breve revisão da literatura existente sobre os nanofluidos, ao longo da qual se realça a caracterização das propriedades termo-físicas, a sua estabilidade coloidal e o seu método de produção. Evidencia – se claramente o potencial dos mesmos como fluidos de transporte de calor, com propriedades melhoradas relativamente aos fluidos convencionais. No terceiro capítulo inicia-se o estudo experimental das propriedades do nanofluido, assim como o seu método de produção e a sua estabilidade coloidal. No quarto capítulo é apresentado o aparato experimental otimizado e o seu processo de calibração. No capítulo cinco é estabelecida uma comparação entre as experiências efetuadas para o fluido base e para os nanofluidos (diferentes concentrações de MWCNTs). No último capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas através da realização deste trabalho, assim como a apresentação de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Nas últimas décadas, os avanços da nanotecnologia levam ao desenvolvimento de uma nova geração de fluidos de permuta. Como mencionado anteriormente, os nanofluidos são constituídos por uma suspensão de nanopartículas num fluido base. A adição de nanopartículas potencia o aumento da condutividade térmica dos fluidos de permuta convencionais e conseqüentemente aumento da sua capacidade de transferência de calor por convecção.

O estudo da transferência de calor requer conhecimento prévio sobre o melhor método de produção e sobre a estabilidade coloidal do nanofluido por forma a garantir o bom funcionamento dos novos fluidos de permuta. Além destes, requer igualmente um conhecimento aprofundado das propriedades térmicas necessárias ao estudo da transferência de calor, como a condutividade térmica, o calor específico e a viscosidade, uma vez que estas podem influenciar a transferência de calor dos nanofluidos.

Este capítulo será dedicado a uma revisão do estado da arte, sobre as metodologias de preparações de nanofluidos, averiguação da estabilidade coloidal e da caracterização das propriedades termofísicas dos nanofluidos.

2.1- Preparação de nanofluidos

A preparação de nanofluidos é o primeiro, passo de extrema relevância para o sucesso de uma suspensão como fluido de transferência de calor, visto que qualquer inconsistência nesta fase irá afetar todos os testes subsequentes. A síntese de nanofluidos não se resume a uma simples mistura líquido-sólido, uma vez que tem que se obter suspensões uniformes, estáveis, duráveis e com baixa aglomeração de nanopartículas. São essencialmente duas as técnicas utilizadas para a produção de nanofluidos, o método do passo único (*single-step method*) e o método dos dois passos (*two-step method*).

Método de passo único

Neste método as nanopartículas são simultaneamente produzidas dispersas no fluido base. O método físico denominado por *Vacuum Evaporation into a Running Oil Substrate* (VEROS) consiste na evaporação das nanopartículas numa câmara de vácuo através de um feixe de elétrons, com auxílio da rotação de um disco coberto por óleo (Akoh, et al.(1978)).

Posteriormente Wagener et al. (1996) modificou este processo através da pulverização magnética sobre alta pressão, preparando suspensões de nanopartículas de Prata (Ag) e Ferro

(Fe). De igual forma, Eastman et al. (1996), desenvolveram uma técnica modificada do VEROS, que consiste em produzir partículas de cobre (Cu) através da condensação direta das nanopartículas a partir da fase vapor sobre um fluido de etileno – glicol (com baixa pressão de vapor) em escoamento numa câmara de vácuo.

Mais recentemente, Zhu et al. (2004) apresentaram um novo método de passo único para produção de nanopartículas de cobre (Cu). Para isso reduziram $\text{CuSO}_4 \cdot \text{SH}_2\text{O}$ com $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em etileno-glicol sobre radiação de micro-ondas e conseguiram obter nanofluidos estáveis.

Método de dois passos

O método de dois passos é o mais amplamente utilizado na preparação de nanofluidos. Neste método, como o próprio nome indica, primeiro produzem-se as nanopartículas (primeiro passo) que posteriormente são dispersas no fluido base (segundo passo), por ação de agitadores mecânicos. Geralmente utilizam-se equipamentos de ultra-sons para dispersar as nanopartículas de forma intensiva e reduzir a aglomeração de nanopartículas.

Por exemplo, Su et al. (2011) preparam nanofluidos de MWCNTs em amoníaco sem qualquer tensoativo. Começaram por modificar a superfície dos MWCNTs com ácido nítrico para uma melhor dispersão destes em amoníaco. Posteriormente adicionaram os MWCNTs ao amoníaco e submeteram-nos durante 2 horas a ultra-sons, tendo obtido suspensões estáveis, sem a utilização de tensoativos.

Também Lamas et al. (2012), preparou nanofluidos com MWCNTs, tendo funcionalizado inicialmente as nanopartículas de MWCNTs por forma a aumentar a probabilidade de dispersão destas no fluido base. No final obtiveram suspensões de MWCNTs em misturas de etileno-glicol e água destilada estáveis.

2.2- Estabilidade de nanofluidos

A preparação de um nanofluido, não consiste simplesmente em misturar nanopartículas, com propriedades termo-físicas excepcionais fluido de permuta convencional. É preciso garantir uma suspensão estável de modo a ser possível a sua aplicação em sistemas de engenharia reais. Contudo, apesar dos desenvolvimentos e investigações nesta temática, o estudo da estabilidade é ainda uma área em fraco desenvolvimento.

Lamas et al. (2012) estudou a estabilidade de nanofluidos com nanotubos de carbono, e definiu que um nanofluido para ser considerado estável tem que cumprir três requisitos: aglomeração reduzida; pouca sedimentação; e integridade estrutural para as condições de estudo.

A caracterização da estabilidade coloidal dos nanofluidos pode ser efetuada através de diversos métodos, sendo os mais utilizados os seguintes:

- Análise por absorção espectral, este método avalia a sedimentação no nanofluido num dado instante, permitindo estabelecer uma relação entre a absorção espectral e a concentração de nanopartículas no nanofluido. A grande desvantagem deste método deve-se ao facto de não conseguir prever a sedimentação a longo prazo. (Kim et al. (2009))
- Analisador de estabilidade LUMiSizer. Lamas et al. (2012) recorre a este método para averiguar a estabilidade de nanofluidos de MWCNTs. As amostras são submetidas a campos centrífugos diferentes (RCFs) que permitem acelerar a sedimentação de MWCNTs, sendo por isso possível calcular a constante de proporcionalidade entre RCFs e a velocidade de sedimentação. Este método permite, assim, determinar a velocidade de sedimentação de forma a determinar o tempo de estabilidade do nanofluido.
- Potencial zeta, também conhecido por potencial eletrocinético. O potencial zeta indica o grau de repulsão entre as partículas adjacentes numa mistura. Quando um nanofluido possui um potencial zeta elevado, as nanopartículas tem um grau de repulsão elevado conferindo a estabilidade da solução. Para potenciais zeta baixos, as nanopartículas tem tendência a agregar-se. Recorrendo ao potencial zeta é possível provar que as nanopartículas não se aglomeram, não sendo possível prever se existe sedimentação do nanofluido. (Huang et al. (2009))

Fatores que influencia a estabilidade

Existem vários fatores que afetam a estabilidade coloidal de nanofluidos, sendo a utilização de ultra-sons na preparação de nanofluidos, e o tempo de ultra-sons uma característica importante. Outra forma de garantir a estabilidade é o controlo do pH das nanopartículas de forma a obter um potencial zeta que permita uma suspensão estável. Por ultimo um dos factores que pode influenciar é adição de dispersantes por forma a evitar sedimentação. (Haddad et al. (2013))

Para estudar a influência dos ultra-sons e da goma-arábica na estabilidade de nanofluidos, Indhuja et al. (2013) preparam uma mistura de nanopartículas de MWCNTs puros com água utilizando ultra-sons durante 4 horas para dispersão da mistura. Posteriormente foi adicionado goma-arábica e misturado com um agitador mecânico e ultra-sons durante 1 hora. Eles verificaram que utilizando este método é possível obter nanofluidos estáveis até uma concentração de nanopartículas de 0,50%.

Garg et al.(2009) dissolveram goma-arábica em água destilada e posteriormente adicionaram MWCNTs recorrendo a ultra-sons para dispersar as nanopartículas no fluido base. Verificando-se que a amostra era estável durante um mês. Meng et al. (2012) recorreu a ácido nítrico para o tratamento das nanopartículas de MWCNT e diluía - as em etileno – glicol recorrendo a ultra-sons. Eles descobriram que as nanopartículas não tratadas tendem

a aglomera-se, levando a um nanofluido pouco estável. Para as nanopartículas tratadas, verificaram que não acontece aglomeração, sendo o nanofluido estável durante dois meses.

Utilizando nanopartículas tratadas com ácido nítrico, Liu et al. (2005) adicionou aos MWCNTs, o dispersante de hidroxisuccinimida (NHS), sendo posteriormente adicionado o fluido base constituído por óleo sintético. Eles verificaram que as nanopartículas encontravam-se dispersas e estáveis.

Na Tabela 1 são apresentados alguns resultados observados por diferentes autores, em relação a estabilidade coloidal do nanofluido com MWCNTs. Foram utilizados alguns dos métodos de análise da estabilidade coloidal anteriormente mencionados, assim como é possível verificar que alguns autores recorrem a análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) e transmissão eletrônica de microscopia (TEM) para verificar a integridade estrutural dos nanotubos de carbono após a evaporação do nanofluido. Esta análise apenas permite verificar a estrutura dos MWCNTs após preparação do nanofluido, não permitindo analisar a estabilidade coloidal. (Liu et al. (2005))

Tabela 1 - Sumário dos principais estudos sobre a estabilidade coloidal de fluidos com MWCNTs

Autor	Fluido base	Análise estabilidade	Sufactante	Estabilidade
Lamas et al. (2012)	EG/água	Lumisizer	Ácido sulfúrico e nítrico	2 Anos
Garg et al. (2009)	Água	TEM	Goma-arábica	1 Mês
Meng et al.(2012)	Glicol	TEM e absorção espectral	Ácido nítrico	2 Meses
Liu et al. (2005)	Óleo motor	TEM e SEM	Ácido nítrico e NHS	-
Yousefi et al. (2012)	Água	TEM	Triton X-100	10 Dias
Kumaresan et al. (2012)	Água	SEM	SDBS	3 Meses
Su et al. (2011)	Amoníaco	TEM	Ácido nítrico	-
Indhuja et al. (2013)	Água	SEM e potencial Zeta	Goma-arábica	-

2.3- Propriedades termo-físicas dos nanofluidos

Grande parte dos trabalhos publicados sobre o estudo das propriedades termo-físicas dos nanofluido, têm incidido as suas investigações na caracterização da condutividade térmica e na capacidade de transferência de calor dos nanofluidos. Contudo, e de modo a possibilitar o correto dimensionamento de sistemas de permuta com nanofluidos, é imprescindível a correta caracterização de todas as propriedades termo-físicas destes. Nos pontos seguintes, serão expostos os resultados de algumas investigações sobre as propriedades termo-físicas que têm influência direta no desempenho dos nanofluidos para a transferência calor.

Densidade

A densidade é a massa por unidade de volume de uma determinada substância. A importância desta propriedade, prende-se com o facto de que um aumento excessivo na densidade influencia fortemente a capacidade e eficiência de bombagem num permutador com convecção forçada. (Çengel (2009))

Kumaresan et al. (2012) estudaram as propriedades termo-físicas de um nanofluido composto por água e etileno-glicol contendo uma suspensão de MWCNTs. Com base nos seus dados experimentais eles verificaram que, a densidade dos nanofluidos aumenta com a concentração de MWCNTs, assim como um desvio relativo aos valores previstos pela correlação de Pak et al. (1998), que este desvio aumenta com a concentração de MWCNTs. A justificação que apresentaram foi de que o fluido enchia o interior dos MWCNTs e que assim aumentava a massa do nanofluido para um determinado volume, tendo como consequência um aumento da densidade.

Vajjha et al. (2009a) mediram a densidade de três nanofluidos contendo nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de antimónio ($Sb_2O_3SnO_2$) e óxido de zinco (ZnO), dispersas num fluido base de (60:40) etileno-glicol/água. Os resultados experimentais para a densidade mostram concordância com os calculados teoricamente.

Sundar et al. (2007) estudaram a variação da densidade dos nanofluidos com a temperatura. Verificaram que, com o aumento da temperatura a densidade diminuía. Similarmente, Harkirat et al. (2010) mediram a densidade de nanofluidos compostos por diferentes concentrações (1 a 4%) de nanopartículas de Al_2O_3 dispersas em água. Os resultados mostram que a densidade de nanofluidos apresenta um valor superior ao do fluido base, variando tendencialmente para um valor superior com o aumento da fração de volume de nanopartículas.

Com base nos resultados experimentais acima mencionados, é possível concluir que a densidade de nanofluidos varia tendencialmente para um valor superior com a concentração de nanopartículas, e varia inversamente com a temperatura.

Calor específico

O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de uma determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. Esta grandeza é extremamente importante pois permite saber a quantidade de energia que um corpo consegue transmitir a outro corpo. (Çengel (2009))

Um dos primeiros estudos sobre o calor específico em nanofluidos foi feito por Pak et al. (1998). Utilizaram a equação (1) para determinar o calor específico dos fluidos.

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,fb} + \phi c_{p,p} \quad \text{Eq.(1)}$$

Sendo $c_{p,nf}$ o calor específico do nanofluido, ϕ a fração volúmica e $c_{p,fb}$ e $c_{p,p}$ é o calor específico do fluido base e o calor específico das nanopartículas, respetivamente.

De acordo com os pressupostos de equilíbrio térmico entre as nanopartículas e os fluidos base, Xuan et al. (2000) determinaram uma correlação para o calor específico dos nanofluido (Eq. 2),

$$c_{p,nf} = \frac{\phi c_{p,p} + (1-\phi) \rho_{fb} c_{p,fb}}{\rho_{nf}} \quad \text{Eq.(2)}$$

Em que ρ_{fb} é a densidade do fluido base e ρ_{nf} a densidade do nanofluido.

Nelson et al. (2009), utilizaram um calorímetro para a medição do calor específico de uma suspensão de diferentes concentrações (0,3 a 0,6%) de nanopartículas de grafite, num lubrificante (polialfaolefina). Verificaram que o calor específico do nanofluido aumenta com a temperatura e com a concentração de nanopartículas. Zhou et al. (2010) mostraram que o calor específico dos nanofluidos varia de acordo com o fluido base, tamanho e concentração de nanopartículas.

Vajjha et al. (2009b) mediram o calor específico de três nanofluidos contendo nanopartículas de Al_2O_3 , SiO_2 e ZnO . As duas primeiras foram dispersas num fluido base com um rácio de 60:40 de etileno-glicol e água, e as nanopartículas de ZnO em água destilada. A caracterização do calor específico foi efetuada para diferentes concentrações de nanopartículas e temperaturas. Com base nos resultados experimentais, desenvolveram a seguinte correlação para o calor específico:

$$c_{p,nf} = \frac{\left(\left(A \frac{T}{T_0} \right) + \left(B \frac{c_{p,p}}{c_{p,fb}} \right) \right)}{(C + \phi)} \times c_{p,fb} \quad \text{Eq.(3)}$$

Sendo T a temperatura do fluido, T_0 a temperatura de referencia (273K) e A,B e C coeficientes de ajustes para os diferentes fluidos de testes.

O trabalho de investigação sobre o calor específico do nanofluidos é limitado em comparação com outras propriedades termo-físicas. Contudo, com base na literatura disponível, é possível concluir que o calor específico do nanofluido depende particularmente dos seguintes fatores: do calor específico do fluido base e das nanopartículas; da concentração em volume de nanopartículas e da temperatura. A literatura sugere que o calor específico do nanofluido diminui com o aumento da concentração de volume e aumenta com a temperatura. (Gopalan et al (2011))

2.4- Viscosidade dos nanofluidos

A caracterização da viscosidade do nanofluido é crucial no dimensionamento de sistemas com convecção forçada. Um aumento da condutividade térmica é esperado, sem afetar as perdas de carga, estando diretamente relacionando com a viscosidade. Desta forma, serão apresentados alguns estudos efetuados ao longo dos últimos anos sobre a viscosidade dos nanofluidos.

Analisado a literatura existente verifica-se que a adição de nanopartículas ao fluido base, aumenta a viscosidade do fluido. Deste modo Lee et al. (2008) utilizando um viscosímetro, mediu a viscosidade de um nanofluido de Al_2O_3 /água para diferentes concentrações de nanopartículas (0,01% a 0,3%). Eles verificaram um aumento da viscosidade em função do aumento da concentração, registrando também uma diminuição com o aumento da temperatura. De igual modo Nguyen et al. (2008) estudaram o mesmo tipo de nanofluidos, de Al_2O_3 /água, e verificaram igualmente um aumento da viscosidade com a concentração das nanopartículas.

De forma averiguar a influência do fluido base na viscosidade, Xie et al. (2008) estudaram nanofluidos constituídos por Al_2O_3 /água e nanofluidos constituídos por uma mistura de etileno-glicol com água (40:60) com as mesmas nanopartículas. Observaram que o nanofluido composto por Al_2O_3 /água têm uma viscosidade superior comparativamente com a viscosidade do segundo fluido de teste. Deste modo é possível destacar a influência do fluido base na viscosidade do nanofluido. Eles também estudaram a dependência da viscosidade em relação ao valor do pH. O ponto isoelétrico que garante a estabilidade das nanopartículas de alumina (Al_2O_3) é de 9,2. Deste modo, concluíram que, quando o valor de pH está longe do valor estabelecido, as nanopartículas encontram-se bem dispersas devido às grandes forças de repulsão entre as mesmas. Anoop et al. (2009a), com o intuito de estudar a influência de diferentes fluidos base, preparam três nanofluidos constituídos por Al_2O_3 /água, Al_2O_3 /etileno-glicol e CuO /etileno-glicol. As experiências mostraram que com o aumento da concentração de nanopartículas, a viscosidade aumenta, sendo superior no nanofluido constituído pelo Al_2O_3 /água em comparação com Al_2O_3 /etileno-glicol. Eles justificam este aumento da viscosidade aos efeitos combinados das forças viscosas e à agregação das partículas. Também verificaram que os nanofluidos preparados apresentam um comportamento newtoniano.

Com o intuito de estudar o efeito da temperatura e das nanopartículas de óxido de cobre (CuO) na viscosidade de nanofluidos, Namburu et al. (2007) preparou um nanofluido com nanopartículas de CuO , sendo o fluido base composto por uma mistura de 40:60 de etileno-glicol/água. Com a variação da concentração de nanopartículas (0% a 6,12%) foi verificado que o valor da viscosidade era quatro vezes superior à viscosidade do fluido base, para a maior concentração. Concluindo que, a viscosidade aumenta com a concentração e diminui com o aumento da temperatura, de igual forma como acontecia para nanopartículas de Al_2O_3 (Lee et al. (2008)).

Mais recentemente Timofeeva et al. (2011) estudaram a influência da concentração e tamanho das nanopartículas, da temperatura, e do valor de pH, na viscosidade. Concluíram que, à mesma temperatura, concentração e valor de pH, o aumento do tamanho de médio de nanopartículas diminui o valor da viscosidade medida. Estes resultados foram verificados para um nanofluido de SiC com etileno-glicol/água com 50:50 relação de volume. Também foi observado um aumento da viscosidade como o aumento da concentração de nanopartículas e diminuição da mesma com o aumento da temperatura.

Para determinar a viscosidade de nanofluidos em função da concentração de nanopartículas e do fluido base inúmeras correlações foram desenvolvidas. Na Tabela 2, é apresentado um quadro resumo com as correlações mais importantes desenvolvidas para determinar a viscosidade de nanofluidos.

Tabela 2 - Sumário de algumas correlações existentes para determinação da viscosidade.

Correlações	Autor	Observações
$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi)$	Einstein et al. (1956)	Concentração de volume muito baixa ($\phi < 0,02\%$)
$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(\frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \right)$	Brinkman et al. (1952)	Modificação do modelo de Einstein
$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2)$	Bachelor et al. (1977)	Consideradas nanopartículas, movimento Browniano e sua interação
$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = \left(1 - \frac{\phi_p}{\phi_{fb}} \right)^{-\eta\phi_{fb}}$	Krieger - Dougherty et al.(1959)	Concentrações mais elevadas ($\phi < 0,64\%$)
$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = \left(1 - \left(\frac{\phi_p}{\phi_{fb}} \right) \left(\frac{a_a}{a} \right)^{1,2} \right)^{-\eta\phi_{fb}}$	Chen et al. (2007)	Modificação da equação de Dougherty-Krieger, onde a_a e a são os raios dos agregados e de nanopartículas, respetivamente
$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = \left(1 - \frac{\phi_p}{\phi_{fb}} \right)^{-2}$	Kitano et al. (1981)	Prevê a viscosidade de mistura de duas fases

2.5- Condutividade térmica dos nanofluidos

Com a leitura de vários trabalhos, verificou-se que é indiscutível que a condutividade térmica dos nanofluidos depende de diversos fatores. São apresentados, de seguida, alguns estudos e principais conclusões sobre a condutividade térmica de nanofluidos.

Com o intuito de identificar os fatores que influenciam a condutividade térmica, Jahanshahi et al. (2010) estudaram a condutividade térmica de um nanofluido composto por SiO_2 /água com concentrações de SiO_2 (1% a 4%). Para tal utilizaram o método do fio quente transiente e verificaram que a condutividade térmica aumenta linearmente com a concentração de nanopartículas. Utilizando o mesmo método, Paul et al. (2010) observaram um aumento da condutividade térmica com a concentração de nanopartículas, verificando igualmente que a diminuição do tamanho médio de nanopartículas, também aumenta a condutividade térmica.

De igual forma, Yu et al (2010b) verificou um aumento da condutividade térmica em função da temperatura, em nanofluidos de Cu/etileno-glicol. Habibzadeh et al. (2010) estudou também a influência da temperatura na condutividade térmica e o valor do pH e verificou que para nanofluidos de SnO_2 /água com baixas concentrações de nanopartículas, a temperatura e o valor do pH tem influência no aumento da condutividade térmica.

Hwang et al. (2006) estudaram diferentes nanofluidos, compostos por diferentes nanopartículas, de forma a verificar a importância das nanopartículas no aumento da condutividade térmica. Utilizaram nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNT), óxido de cobre (CuO) e dióxido de silício (SiO_2) em diferentes fluidos base, de forma a estudar a influência do fluido base na condutividade térmica, tais como etileno-glicol, água e óleo mineral. Os resultados mostraram que as MWCNT apresentam um aumento da condutividade térmica superior ao das outras nanopartículas.

Recentemente Lamas et al. (2011), utilizando o método do fio quente transiente, estuda a variação de condutividade térmica em função da temperatura, para nanofluidos compostos por MWCNT e etileno-glicol/água. Verificaram que a condutividade térmica aumenta cerca de 7% para o nanofluido com 1,5% vol de MWCNT. Igualmente, anteviram que o movimento browniano não seria o único mecanismo responsável pelo aumento da condutividade térmica verificado.

Na Tabela 3 são apresentados alguns resultados empíricos, relativamente à condutividade térmica dos nanofluidos. Constituídos por diferentes nanopartículas, diferentes fluidos base e diferentes concentrações.

Tabela 3 - Sumário de alguns resultados empíricos da condutiva térmica de nanofluidos.

Nanofluido	Concentração volúmica	Aumento	Autor
Fe ₃ O ₄ /querosene	1%	34%	Yu et al (2010a)
SiO ₂ /água	1%	3,23%	Jahanshahi et al (2010)
SiO ₂ /água	4%	23%	Jahanshahi et al (2010)
Au/água	0,00026%	48%	Paul et al. (2010)
Al ₂ O ₃ /EG-água	10%	35%	Vajjha et al. (2009)
CuO/EG-água	10%	32%	Vajjha et al. (2009)
ZnO/EG-água	10%	17%	Vajjha et al. (2009)
Cu/EG	0,30%	0,50%	Yuet al. (2010b)
Cu/EG	5%	8%	Yuet al. (2010b)
Cu/EG	11,%	16%	Yuet al. (2010b)
Cu/EG	33,%	46%	Yuet al. (2010b)
SnO ₂ /água	0,024%	7%	Habibzadehet al. (2010)
Al-Cu/EG	1,50%	200%,	Chopkar et al. (2006)
MWCNT/água	3%	13%	Phuoc et al. (2011)
MWCNT/EG	1,50%	17%	Lamas et al. (2011)
MWCNT/água	0,45%	19,73%	Kumaresan et al. (2012)

No final do século XIX, Maxwell et al. (1891) propôs a primeira correlação para a determinação da condutividade térmica de suspensões. Contudo, apesar dos inúmeros estudos teóricos e empíricos sobre a condutividade térmica dos nanofluidos, ainda não existe nenhum modelo amplamente adotado pela comunidade académica. Assim na Tabela 4 sumarizam-se algumas correlações desenvolvidas para quantificar a condutividade térmica dos nanofluidos.

Tabela 4 - Sumário de algumas correlações existentes para determinação da condutividade térmica.

Correlações	Autor	Observações
$k_{nf} = k_{fb} \frac{k_p + 2k_{fb} + 2\phi(k_p - k_{fb})}{k_p + (n - 1)k_{fb} - \phi(k_p - k_{fb})}$	Maxwell et al. (1891)	Inclui o grau de esfericidade das nanopartículas. Onde n é o grau de esfericidade. Para nanopartículas esférica, n = 3, o que reduz a fórmula de Maxwell.
$k_{nf} = k_{fb} \frac{k_p + (n - 1)k_{fb} + (n - 1)\phi(k_p - k_{fb})}{k_p + (n - 1)k_{fb} - \phi(k_p - k_{fb})}$	Hamilton et al. (1962)	Considerada a influência de movimento Browniano
$k_{nf} = \phi k_p + (1 - \phi)k_{fb}$	Bhattach et al. (2004)	
$k_{nf} = k_{fb} \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{k_p}{k_p - k_{fb}} \ln \frac{k_p + k_{fb}}{2k_{fb}}}{1 - \phi + 2\phi \frac{k_{fb}}{k_p - k_{fb}} \ln \frac{k_p + k_{fb}}{2k_{fb}}}$	Xue et al. (2005)	Nanofluidos de nanotubos de carbono
$k_{nf} = \frac{(k_p - k_{lr})\phi k_{lr}(2\beta_1^3 - \beta^3 + 1) + (k_p + 2k_{lr})\beta_1^3[\phi\beta^3(k_{lr} - k_{fb}) + k_{fb}]}{\beta_1^3(k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\phi(\beta_1^3 + \beta^3 - 1)}$	Leong et al. (2006)	Nanopartículas esféricas, onde: $\beta = \frac{t}{r}$, $\beta_1 = \frac{t}{2r}$
$k_{nf} = k_{fb} \frac{k_{pe} + 2k_{fb} + 2\phi(k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3}{k_{pe} + k_{fb} - \phi(k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3}$	Yu et al. (2003)	Onde k_{pe} é a condutividade térmica equivalente das nanopartículas e que foi calculado por Schwartz et al. (1995).
$k_{pe} = k_p \frac{[2(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)]\gamma}{-1(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)}$		Sendo, $\gamma = \frac{k_{lr}}{k_p}$
$k_{nf} = \frac{(k_p - k_{lr})\phi k_{lr}(2\beta_1^2 - \beta^2 + 1) + (k_p + 2k_{lr})\beta_1^2[\phi\beta^2(k_{lr} - k_{fb}) + k_{fb}]}{\beta_1^2(k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\phi(\beta_1^2 + \beta^2 - 1)}$	Murshed et al. (2008)	Para nanopartículas cilíndricas

2.6- Transferência de calor por convecção de nanofluidos

Na última década, vários investigadores realizaram inúmeras experiências com o intuito de explicar os fenômenos de transferência de calor em sistemas contendo nanofluidos. Atualmente existem muitas publicações que abordam a transferência de calor por convecção forçada em tubos, sendo as mais importantes descritas de seguida.

Em 2003, Xuan et al (2003) estudaram a transferência de calor para misturas de Cu/água sujeitas a escoamentos turbulentos e laminares em tubos circulares com 10mm de diâmetro. Os resultados mostraram que a suspensão de nanopartículas aumenta notavelmente o coeficiente de transferência de calor por convecção quando comparados com os fluido base. Wen et al. (2004) observaram experimentalmente a transferência de calor em nanofluidos de Al_2O_3 /água. Concluíram que para concentrações de nanopartículas superiores e números de Reynolds elevados, o coeficiente de transferência de calor por convecção pode aumentar significativamente. Foi também observado que o aumento do coeficiente de transferência de calor é superior na região de entrada do tubo, diminuindo com o aumento da distância axial. Eles atribuíram o aumento da transferência de calor por convecção à migração das partículas, que pode resultar numa distribuição não uniforme da condutividade térmica e da viscosidade, reduzindo a espessura da camada limite térmica.

Estudando a dependência do aumento do coeficiente de transferência de calor em relação ao aumento da condutividade térmica, He et al. (2007) investigaram a transferência de calor em nanofluidos de Al_2O_3 /água, sujeitos a um fluxo laminar, dentro de um tubo circular com temperatura de parede constante. Concluíram que para além do aumento da condutividade térmica, outros fatores, como o movimento caótico das nanopartículas, o movimento browniano e migração das partículas podem estar associados ao aumento da transferência de calor por convecção nos nanofluidos.

Chen et al. (2008) produziu nanofluidos com nanotubos de titanato (TNT) dispersos em água, com o intuito de estudar a condutividade térmica e o coeficiente de transferência de calor neste nanofluido. Foi observado que um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção, que é superior para números de Reynolds elevados e diminui ao logo da posição axial. Outra conclusão retirada dos testes efetuados, foi o facto de nanofluidos com nanotubos de titanato apresentarem valores superiores para o coeficiente de transferência de calor por convecção, comparativamente com nanofluidos contendo nanopartículas esféricas de titânio, demonstrando que a geometria da nanopartícula tem influência no coeficiente de transferência de calor por convecção.

Para estudar o efeito do tamanho médio de nanopartículas em nanofluidos, Anoop et al. (2009b) realizaram testes em nanofluidos de Al_2O_3 /água na região de desenvolvimento sob um fluxo de calor constante. Para tal utilizaram dois tamanhos de nanopartículas (45nm e 150nm), tendo observado que o nanofluido que possui as nanopartículas de menor tamanho apresentava um maior coeficiente de transferência de calor. Eles concluíram que o aumento de coeficiente calor depende do tamanho das nanopartículas e que esse aumento não se deve exclusivamente ao aumento da condutividade térmica, mas também a outros fenómenos como migração de partículas e dispersão térmica.

Outros autores, tais como Hwang et al. (2009) mediram o coeficiente de transferência de calor por convecção em nanofluidos de Al_2O_3 /água, fluindo num tubo circular aquecido uniformemente e para um fluxo laminar totalmente desenvolvido. Verificaram um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção superior ao aumento registado para a

condutividade térmica. Este aumento superior do coeficiente de transferência de calor por convecção pode dever-se ao perfil de velocidade achatada devido à migração de nanopartículas induzido pelo movimento browniano e pelo efeito Soret.

Amrollahi et al. (2010) estudaram os efeitos da temperatura e concentração no coeficiente de transferência de calor por convecção em nanofluidos à base de água e MWCNT, para um fluxo laminar. Os resultados experimentais observados para as diferentes concentrações de nanotubos de carbono (0,1%, 0,12%, 0,2% e 0,25%) nos nanofluidos mostram que a presença de nanopartículas e que o aumento da concentração de MWCNTs, aumenta o coeficiente de transferência de calor. O mesmo efeito não se verifica com o aumento da temperatura, registrando uma diminuição do coeficiente de transferência de calor em relação ao fluido base. Este facto é pela maior facilidade de aglomeração das nanopartículas a altas temperaturas.

Moraveji et al. (2011) estudaram a influência da variação de concentração de nanopartículas no coeficiente de transferência de calor. Verificaram que o coeficiente de transferência de calor aumenta em função da concentração de nanopartículas, obtendo valores mais elevados para números de Reynolds superiores.

Heyhat et al. (2013) estudaram experimentalmente a transferência de calor por convecção de nanofluidos de Al_2O_3 /água fluindo através de um tubo circular quando sujeito a um fluxo de temperaturas constante. Verificaram que o coeficiente de transferência de calor do nanofluido aumenta com o aumento do número de Reynolds, assim como aumenta com a concentração de nanopartículas.

No seguimento dos estudos efetuados, Esmailzadeh et al. (2013) estudaram o desempenho da transferência de calor por convecção, de um nanofluido de Al_2O_3 /água num escoamento laminar através de um tubo circular sujeito a um fluxo de calor constante. Concluíram que a taxa de transferência é máxima na entrada da secção de ensaio ou em distâncias axiais (x/D) mais baixas. Deste modo, a fim de beneficiar dos efeitos da migração das nanopartículas, o nanofluido deve ser utilizado em escoamentos em desenvolvimento. Outra importante conclusão é que a taxa de transferência de calor por convecção diminui com o aumento do número de Reynolds e com o x/D .

A capacidade de transferência de calor por convecção em nanofluidos de MWCNTs e água, foi estudado por Abreu et al. (2013). Eles concluíram que, para um nanofluido de concentração de 0,5% vol de MWCNTs, que flui num tubo cilíndrico sujeito a fluxo de calor constante com diferentes regimes de escoamento, apresenta um aumento no coeficiente de transferência de calor de 47% relativamente ao fluido base. Contudo, justificaram que os valores obtidos por si só não podiam ser atribuídos aos aumentos da condutividade térmica (7%), mas sim a outros fatores, como a interação entre partículas e formação de uma rede percolação. Na Tabela 5 apresentam-se algumas características e resultados, obtidos por diferentes grupos de investigação, para a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Tabela 5 - Sumário de alguns resultados empíricos do coeficiente de transferência de calor por convecção de nanofluidos.

Nanofluido	Concentração volúmica	Escoamento	Aumento	Autor
Cu/água	2%	Laminar	60%	Li et al. (2002)
Al ₂ O ₃ -Cu / água	0,10%	Laminar	13,56%	Suresh et al. (2012)
Al ₂ O ₃ /água	6%	Laminar	27%	Rea et al. (2009)
ZrO ₂ /água	1,32%	Laminar	3%	Rea et al. (2009)
Al ₂ O ₃ /água	1,6%	Laminar	41%	Wen et al. (2004)
Al ₂ O ₃ /água	0,30%	Laminar	8%	Hwang et al. (2009)
MWCNT/água	0,12%	Laminar	25 %	Amrollahi et al. (2010)
Grafite/água	2%	Laminar	22%	Yang et al. (2005)
TNT/água	2,5%	Laminar	13,50%	Chen et al. (2008)
MWCNT/água	0,45%	Turbulento	159,30%	Kumaresan et al. (2012)
TiO ₂ /água	1%	Turbulento	14%	Duangthongsuk et al. (2010)
TiO ₂ /água	2%	Turbulento	26%	Duangthongsuk et al. (2010)
CuO/EG-água	6%.	Turbulento	35%	Namburu et al. (2009)
Cu / água	2%	Turbulento	60%	Xuan et al (2003)
MWCNT/água	0,50%	Turbulento	47%	Abreu et al. (2013)

Foi possível observar pelos resultados experimentais da Tabela 5, que o coeficiente de transferência de calor por convecção depende da concentração de nanopartículas, do número de Reynolds e do tipo de nanofluido produzido, verificando-se um maior aumento para regimes turbulentos e para nanofluidos com maiores concentrações de nanopartículas.

Número de Nusselt

O número de Nusselt é uma grandeza usada para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, baseando se na análise adimensional, que é utilizada para determinar parâmetros através de relações de similaridade, (Çengel et al. (2009)).

Zeinali et al. (2006) estudaram a transferência de calor em nanofluidos compostos por CuO/água e Al₂O₃/água num tubo circular sujeito a uma temperatura de parede constante. Posteriormente foi feita uma comparação entre os resultados experimentais e os previstos pelas correlações teóricas clássicas utilizadas para fluidos convencionais. Eles verificaram que as correlações clássicas não conseguem prever a transferência de calor para os nanofluidos. Desta forma, vários investigadores têm vindo a centrar esforços para, de forma experimental e numérica desenvolverem correlações que permitam o estudo da transferência de calor em nanofluidos. Na Tabela 6, apresentam-se alguns dos estudos e correlações desenvolvidas, para o calculo do número de Nusselt, para nanofluidos sujeitos a fluxo laminar ou turbulento.

Tabela 6 - Sumário para algumas correlações existentes para a determinação do número de Nusselt de nanofluidos.

Correlações	Autor	Observação	Escoamento
$Nu = 0,4328(1 + 11,258 \phi^{0,754} Pe^{0,218})Re^{0,333} Pr^{0,4}$	Li et al. (2002)	Para nanofluidos de Cu/água $800 \leq Re \leq 4000$ $0 \leq \phi \leq 2 \%$	Laminar
$Nu = 0,031(Re Pr)^{0,68}(1 + \phi)^{95,73}$	Saidur et al. (2011)	Para nanofluidos de Al ₂ O ₃ -Cu/água $Re \leq 2300$ $0 \leq \phi \leq 0,1 \%$	Laminar
$Nu = 1,619 (X^+)^{\frac{1}{3}}$	Rea et al. (2009)	Para nanofluidos com Al ₂ O ₃ $431 < Re < 2000$ $0 \leq \phi \leq 6 \%$ Para nanofluidos com ZrO ₂ $140 < Re < 362$ $0 \leq \phi \leq 3 \%$ Onde, $X^+ < 0,01$, $X^+ = \frac{2 \left(\frac{x}{D}\right)}{Re pR}$	Laminar
$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,5}$	Pak et al. (1998)	Para nanofluidos de Al ₂ O ₃ /água e TiO ₂ /água $10^4 < Re < 10^5$ $6,54 \leq Pr \leq 12,33$	Turbulento
$Nu = 0,059(1 + 7,6236 \phi^{0,6886} Pe^{0,001}) Re^{0,92338} Pr^{0,4}$	Xuan et al. (2003)	Para nanofluidos de Cu/água $1 \times 10^4 < Re < 2,5 \times 10^5$ $0 \leq \phi \leq 2 \%$	Turbulento
$Nu = 0,074 Re^{0,707} Pr^{0,385} \phi^{0,074}$	Duangthongsuk et al. (2010)	Para nanofluidos de TiO ₂ /água $3000 < Re < 18000$ $2 \leq \phi \leq 2 \%$	Turbulento
$Nu = 0,085Re^{0,71} Pr^{0,35}$	Maiga et al. (2006)	Para nanofluidos de Al ₂ O ₃ /água e Al ₂ O ₃ /EG $10^4 < Re < 5 \times 10^5$ $6,6 \leq Pr \leq 13,9$ $0 \leq \phi \leq 10 \%$	Turbulento
$Nu = 0,067 Re^{0,71} Pr^{0,35} + 0,0005Re$	Saidur et al. (2011)	Para nanofluidos de TiO ₂ /água $5000 < Re < 30000$ $0 \leq \phi \leq 0,25 \%$	Turbulento
$Nu = 0,021172 Re^{0,8} Pr^{0,5} (1 + \phi)^{0,5181}$	Sundar et al. (2012)	Para : $3000 < Re < 22000$ $0 \leq \phi \leq 0,6 \%$ $3,72 < Pr < 6,5$ Para nanofluidos de Fe ₃ O ₄	Turbulento
$Nu = 0,065(Re^{0,65} - 60,22)(1 + 0,0169 \phi^{0,15})Pr^{0,542}$	Vajjha et al. (2010)	$3000 < Re < 16000$ Para nanofluidos de CuO/EG-água e SiO ₂ /EG-água $0 < \phi < 0,1 \%$ Para nanofluidos de Al ₂ O ₃ /EG-água $0 \leq \phi \leq 0,06 \%$	Turbulento

Da análise da Tabela 6 verifica-se que alguns investigadores têm em consideração a influência da concentração das nanopartículas, assim como a constituição do nanofluido para o número de Nusselt. Estes dois parâmetros estão diretamente relacionados com o aumento da transferência de calor, sendo por isso extremamente importante relacionar o número de Nusselt com os dois parâmetros referidos.

Número de Prandtl

O número de Prandtl é um número adimensional que aproxima a razão de viscosidade cinemática e difusividade térmica de um fluido, sendo uma medida da eficiência destas transferências nas camadas limites hidrodinâmica e térmica. (Çengel (2009))

Vajjha et al. (2012) estudaram as propriedades que influenciam a transferência de calor em nanofluidos contendo nanopartículas de CuO, Al₂O₃ e SiO₂ e concluíram que o número de Prandtl depende das propriedades dos fluidos como a densidade, a condutividade térmica e o calor específico, que por sua vez dependem da temperatura. Verificaram também, que a adição de diferentes concentrações de nanopartículas afeta o número de Prandtl dos nanofluidos, à temperatura ambiente. Todos os três nanofluidos oferecem maior número de Prandtl do que o fluido base, diminuindo com o aumento da temperatura. Podendo-se concluir que a concentração de nanopartículas e temperatura podem influenciar o número de Prandtl de um nanofluido.

Capítulo 3 - Caracterização dos nanofluidos

A caracterização experimental dos nanofluidos é um processo fundamental para o conhecimento das suas propriedades fundamentais, nomeadamente, a sua estabilidade coloidal e as suas propriedades termo-físicas.

No presente capítulo, numa primeira parte, é feita uma descrição do processo de preparação dos nanofluidos que são objeto de estudo nesta tese, desde o tratamento químico efetuado aos nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNTs), até ao estudo da estabilidade coloidal. Numa segunda parte é efetuada a caracterização de algumas propriedades termo-física dos nanofluidos produzidos, tais como: viscosidade, condutividade térmica, calor específico e densidade. Conhecendo-se estas propriedades será possível posteriormente calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção.

3.1- Material

Para a preparação dos nanofluidos, foram MWCNTs adquiridos à empresa “Cheap Tubes Inc, USA”, com as especificações listadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações dos nanotubos de carbono de múltiplas paredes utilizados no trabalho experimental.

Propriedades	Especificações
Diâmetro externo	20 – 40 nm
Diâmetro interno	5 – 10 nm
Comprimento	10 – 30 nm
Pureza	95%
Área específica da superfície	110m ² /g
Condutividade elétrica	>100 S/cm
Densidade	~2,1 g/cm ³

Uma vez que os MWCNTs tendem a se aglomerar, devido às forças de Van der Waals, é necessário modificar a superfície dos MWCNTs por forma a conseguir-se uma melhor distribuição destes no fluido base, e desta forma conseguir-se um nanofluido estável e homogéneo. Assim, foi efetuado um tratamento químico superficial aos nanotubos com ácido sulfúrico e nítrico. O procedimento utilizado foi o descrito por Esumi et al. (1996). Para o tratamento químico, a quantidade requerida de MWCNT's foi diluída numa mistura de ácido sulfúrico e ácido nítrico numa fração de (3:1) e aquecida a uma temperatura de 413

K durante 30 minutos. Posteriormente, os MWCNT's foram lavados com água destilada até atingir um pH~7. Posteriormente foram secos numa estufa a uma temperatura de 373 K, durante pelo menos 72 horas para evaporar a humidade. Finalmente, os MWCNT's secos são moídos num moinho, antes de serem misturados como o fluido base.

Para aferir a qualidade dos MWCNT's funcionalizados foi efetuada espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*). A Figura 1 mostra dois espectros: para os MWCNTs comprados, e para os MWCNTs após tratamento químico. Como se pode verificar, as duas amostras apresentam um pico centrado a 1630 cm^{-1} , que diz respeito ao carbono (C=C). Este pico mostra que a integridade dos MWCNTs não foi afetada pelo tratamento químico. Os picos a 1164 e 1203 cm^{-1} estão relacionados com os grupos fenólico e carboxílico, e o pico a 1699 cm^{-1} , corresponde á ligação C=O dos mesmos grupos (Lamas et al. (2012)). Estes resultados mostram claramente a excelente qualidade dos MWCNTs funcionalizados.

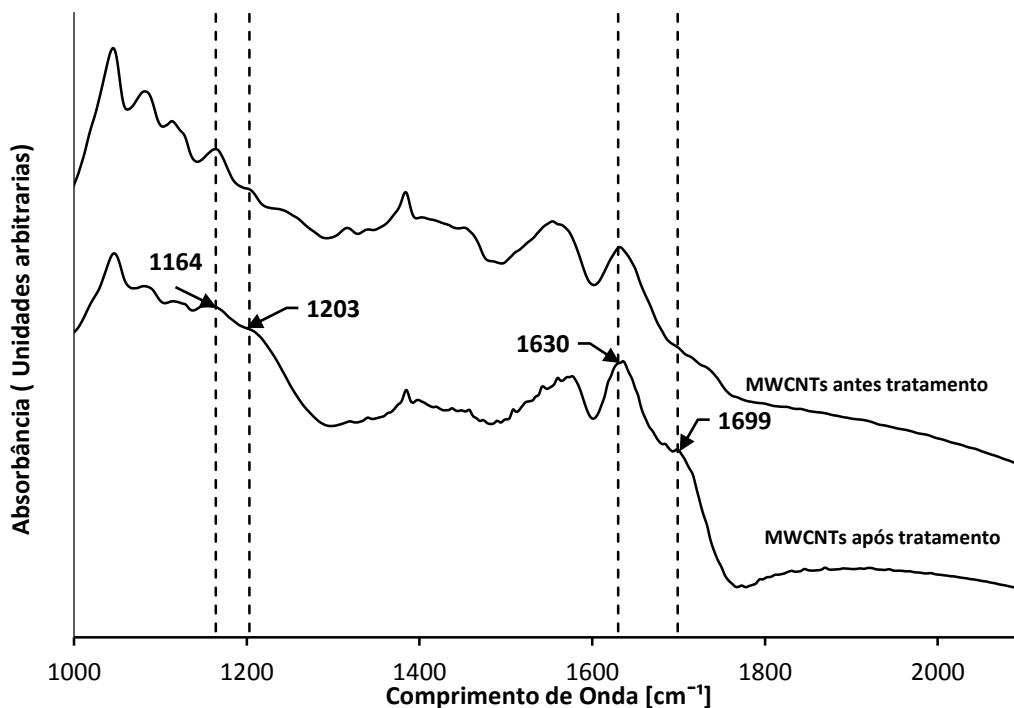


Figura 1 - Espectroscopia de FTIR de MWCNTs.

Algumas imagens de microscopia eletrónica de varrimento (SEM – *Scanning Electron Microscopy*) foram recolhidas para aferir a morfologia dos MWCNTs, antes e após tratamento químico. Tal como é mostrado na Figura 2, os MWCNTs que se encontravam completamente aglomerados, antes do tratamento químico (Figura 2 (a)), encontram-se, após funcionalização, completamente desaglomerados (Figura 2 (b)).

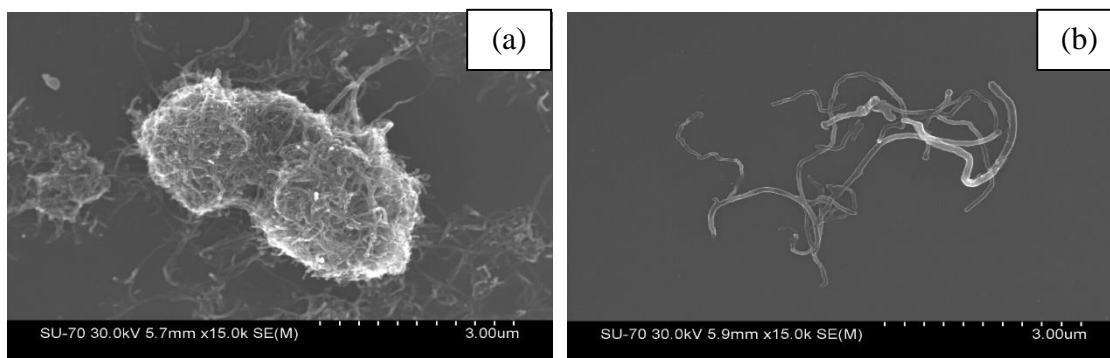


Figura 2 - Imagens de microscopia eletrônica de varrimento, dos MWCNT's (a) antes do tratamento e (b) após tratamento químico.

3.2- Preparação de nanofluidos

As propriedades termo-físicas de um nanofluido dependem da sua homogeneidade e da estabilidade da suspensão. Desta forma, é extremamente importante a correta preparação do nanofluido, visto que terá repercussões nos resultados e cálculos subsequentes.

O plano experimental que se pretende realizar no âmbito deste trabalho inclui testes em um fluido base de uma mistura de 30:70 de etileno-glicol/água-destilada (30EG-70AD), e em nanofluidos com 0.25 e 0.50 % vol. MWCNTs no mesmo fluido base. A seleção de tais fluidos base prende-se essencialmente pelo facto destes fluidos serem utilizados em sistemas de refrigeração comuns e, por isso, grande parte das suas propriedades termo-físicas já terem sido alvo de estudo.

Assim, o procedimento utilizado para a preparação dos nanofluidos foi o seguinte:

- 1 - Determinação da quantidade de MWCNTs necessária para preparar 500 ml de nanofluido com 0,25% e 0,50% vol. de MWCNT.
- 2 - Adição de MWCNTs ao fluido base (30EG-70AD)
- 3 - Submeter a mistura a ultra-sons (com uma energia de 67J/ml durante 1 hora).

Verificou-se (a olho nú) que após 48 horas da preparação, o nanofluido mantinha-se estável, isto é, não se encontrava qualquer tipo de sedimentação no fundo do recipiente, estando pronto a ser utilizado nos diferentes testes.

3.3- Estudo da estabilidade dos nanofluidos

A estabilidade de uma suspensão é extremamente importante tendo em conta que qualquer alteração na estabilidade do nanofluido, terá repercussões nas propriedades do mesmo. Tal como foi referido no capítulo anterior, Lamas et al. (2013), preparou nanofluidos pela técnica descrita anteriormente e através do analisador de estabilidade acelerada, aferiu a estabilidade dos nanofluidos através da determinação do tempo de vida dos mesmos. Na Figura 3 estão representados os resultados relativos à velocidade de sedimentação (a) e ao tempo de vida útil (b) de nanofluidos compostos por uma mistura de (30:70) EG/AD e MWCNTs com diâmetro de 20-40nm e comprimento 10-30nm. Com base nos resultados obtidos, é possível verificar que a velocidade de sedimentação (assim como tempo de vida útil) varia fortemente com a razão de aspeto dos MWCNTs (razão entre o seu comprimento e o seu diâmetro), assim como com a concentrações dos MWCNTs no fluido base. Da mesma forma, é possível determinar que, para o nanofluido com 0,25% vol. MWCNTs o tempo de vida útil de aproximadamente 4 anos, e com uma velocidade de sedimentação de 0,016 mm/dia.

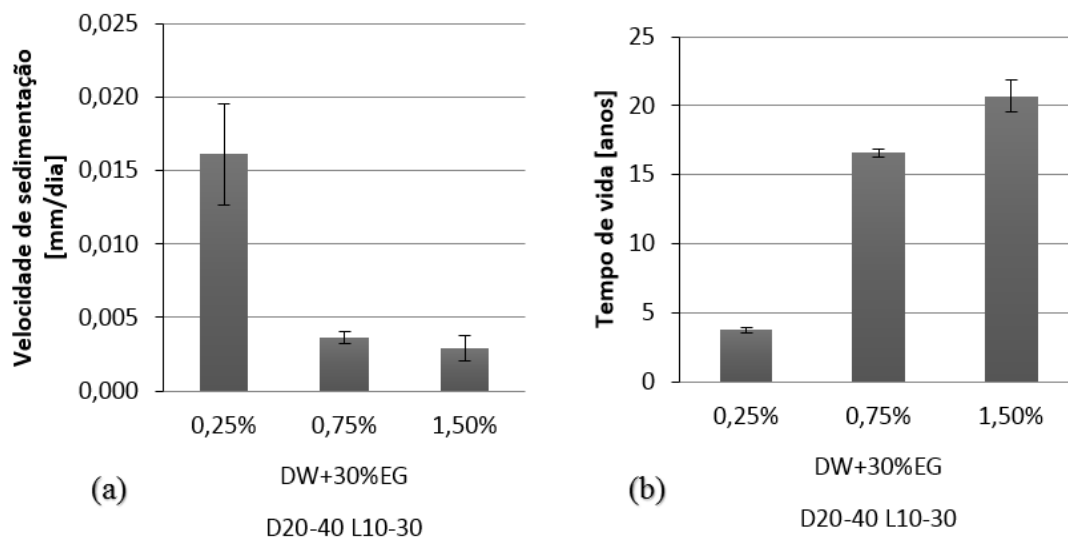


Figura 3 - Estudo da estabilidade do nanofluido compostos por (30:70) EG/AD e MWCNTs (D= 20-40nm e L=10-30nm), (a) Velocidade de Sedimentação e (b) tempo de vida útil (Lamas et al. 2013).

No gráfico 3(a), pode-se verificar que, para os nanofluidos que são objeto de estudo na presente tese, a velocidade de sedimentação é de 0,016 mm/dia para o nanofluido de 0,25% vol MWCNTs, para os nanofluidos de 0,50% vol MWCNTs o estudo não apresenta a sua velocidade de sedimentação, mas pode-se concluir que esta velocidade é inferior a do nanofluido de 0,25% vol MWCNTs e superior a 0,004 mm/dia. No que traduz um tempo de vida útil de 4 anos para o nanofluido de 0,25% vol MWCNTs e de 4 a 16 anos para o nanofluido de 0,50% vol MWCNTs. Dos resultados de estabilidade apresentados conclui-se que os nanofluidos preparados para estudar a presente tese, apresentam boa estabilidade (>4 anos).

3.4- Caracterização dos nanofluidos

Tal como já se referiu anteriormente, é extremamente importante conhecer as propriedades termo-físicas dos nanofluidos, por forma a ser possível estudar e compreender os mecanismos de transferência de calor intrínsecos aos nanofluidos. Neste sentido, foi efetuada uma caracterização das seguintes propriedades do nanofluido: densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade dinâmica. Sempre que se revelou impossível obter resultados de forma experimental, foram utilizadas aproximações matemáticas.

A densidade é uma das propriedades de extrema importância para a averiguação experimental do coeficiente de transferência de calor. Contudo, devido à ausência de dados experimentais e de equipamentos que permitam a sua determinação, recorreu-se a correlações teóricas para o cálculo da densidade do nanofluido. A correlação apresentada na equação 4, é utilizada no cálculo da densidade dos nanofluidos estudados, e que relaciona a fração volúmica com a densidade das nanopartículas e do fluido base tendo sido proposta por Pak et al. (1998).

$$\rho_{nf} = (1 + \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_p \quad \text{Eq.(4)}$$

Sendo ρ_{nf} a densidade do nanofluido, ϕ a fração volúmica, ρ_{fb} e ρ_p a densidade do fluido base e das nanopartículas, respetivamente.

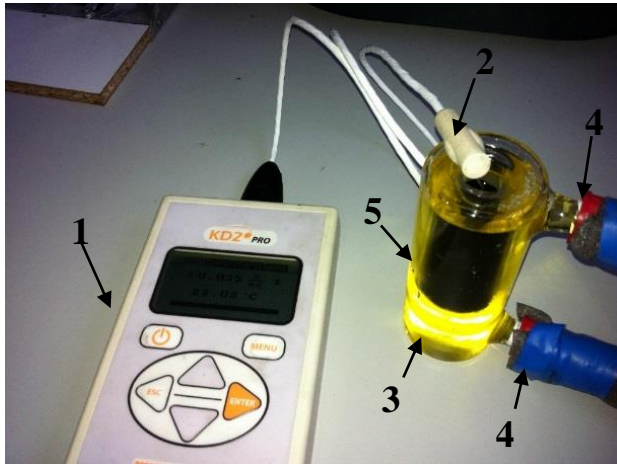
O calor específico é outra propriedade termo-física de extrema importância para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção. No entanto, devido à ausência de dados experimentais, foi necessário recorrer a uma correlação teórica para dedução desta propriedade. Foi utilizada para determinar o calor específico a correlação da Eq.(1).

Os dados necessários ao cálculo destas propriedades, (densidade e o calor específico) do fluido base foram retirados do ASHRAE Handbook (2009), enquanto que a densidade das nanopartículas foram fornecidas pela empresa e o calor específico retirado do trabalho científico de Pradhan et al. (2009).

A condutividade térmica indica a capacidade de um material conduzir calor, sendo de extrema importância para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, assim como para o número de Nusselt.

A condutividade térmica foi medida experimentalmente utilizando o método do Fio Quente Transiente (*Transient hot wire THW*). Este método consiste numa agulha fina metálica de alta condutividade térmica, que é utilizado como fonte de calor e que contem um sensor de temperatura. A agulha metálica é colocada no interior de frasco de dupla casca, onde vai permanecer em contacto com fluido de teste. A agulha metálica é aquecida e é registado o aumento de temperatura que possibilita o cálculo da condutividade térmica através da equação de Fourier. O aparato experimental utilizado para a determinação da

condutividade térmica está representado na Figura 4. Este é composto por um KD2 Pro (1) com um sensor para líquidos (2), um banho térmico (4) para permitir o estudo da condutividade térmica com a variação de temperatura, e um frasco de dupla casca (3) para colocar o fluido em análise. A condutividade térmica do fluido base e dos nanofluidos foi medida numa gama de temperaturas de 283 a 333 K.



Legenda:

- 1 – KD2 Pro
- 2 – Agulha metálica com sensor de temperatura
- 3 – Frasco dupla-casca
- 4 – Entrada/saída do banho térmico
- 5 – Nanofluido para teste

Figura 4 - Aparato experimental utilizado para medir experimentalmente a condutividade térmica.

Na Figura 5 mostra-se a variação da condutividade térmica para o nanofluido base (30EG-70AD) e para os nanofluidos, com a temperatura. Verifica-se que a condutividade térmica dos fluidos testados aumenta com o aumento da temperatura e com a concentração de nanopartículas. De igual forma é possível aferir um aumento relativo (ao fluido base) da condutividade térmica, para uma temperatura de 293K, de 0,87% e 1,2% para o nanofluido com 0,25% vol e 0,50% vol de MWCNT, respetivamente. Este pequeno aumento poderá influenciar propriedades tais como o coeficiente de transferência de calor por convecção.

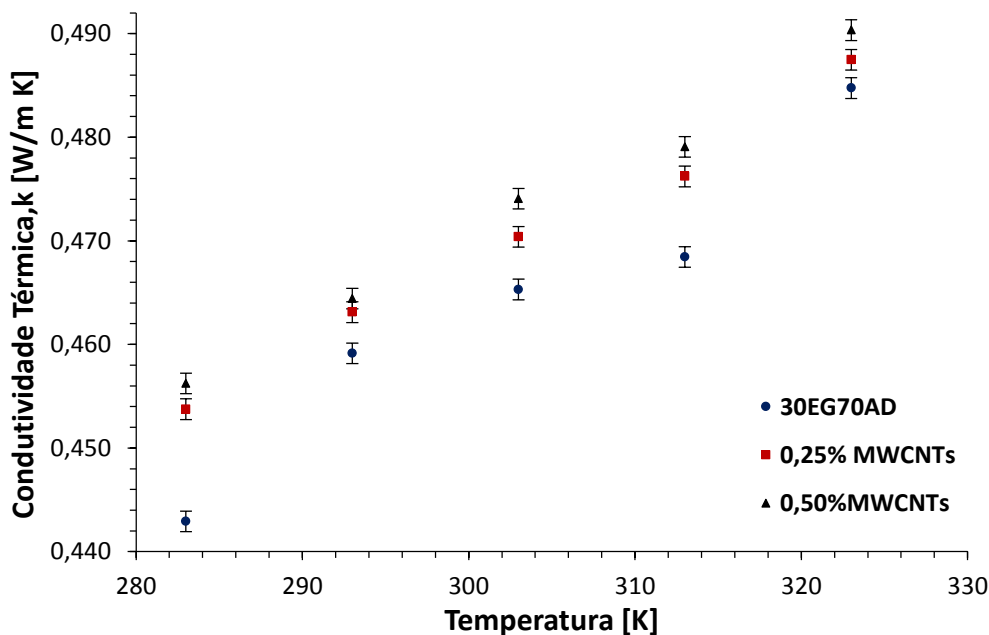


Figura 5 - Condutividade Térmica dos diferentes fluidos em função da temperatura.

A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, a uma dada temperatura. Ou seja, quanto maior a viscosidade, maior será a energia gasta pela bomba para conseguir movimentar o fluido, num sistema com convecção forçada. A determinação desta propriedade é crucial, de modo a averiguar o caudal de bombagem necessário, para os diferentes fluidos e um dado escoamento.

A viscosidade dos fluidos testados, foi determinada experimentalmente através de um aparato constituído por um reómetro Brookfield DV-III ultra e um banho térmico, de modo a permitir a análise da viscosidade com a temperatura. As medições da viscosidade foram efetuadas a velocidades de corte (*shear rate*) de 100 a 250 s^{-1} , e temperaturas de 283 a 333K. Na Figura 6 apresenta-se uma comparação entre as viscosidades para os diferentes fluidos estudados, a diferentes temperaturas. Verifica-se um aumento da viscosidade com a presença de nanopartículas, verificando-se um aumento da viscosidade em função do aumento da concentração de nanopartículas e da temperatura. É possível aferir um aumento relativo da viscosidade, para a temperatura de 293K, de 12,7% e 17% para o nanofluido com 0,25% vol e 0,50% vol de MWCNT, respetivamente.

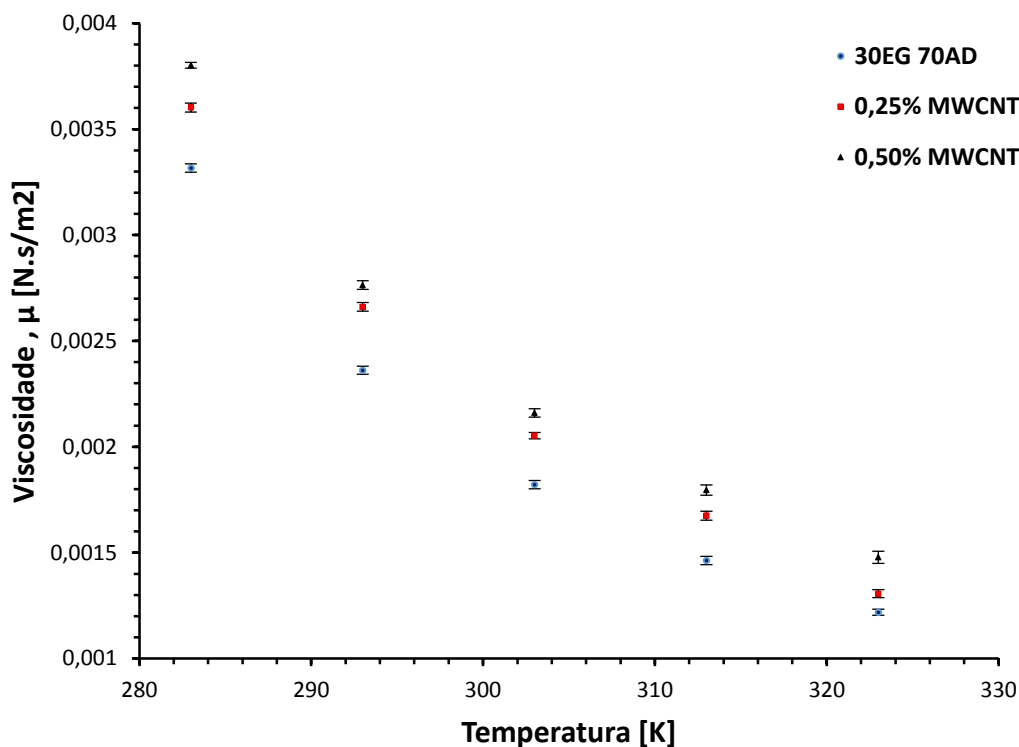


Figura 6 - Viscosidade dos diferentes fluidos em função da temperatura.

Na Tabela 8 é feito um resumo das propriedades descritas que são necessárias para a realização da atividade experimental. Como mencionado anteriormente, na ausência de dados experimentais, foram utilizadas as correlações mencionadas para o cálculo de algumas propriedades termo-físicas.

Tabela 8 - Resumo propriedades termo – físicas dos fluidos de teste a 293 K

Propriedades		Fluidos		
		Fluido Base (30%EG 70% AD)	Nanofluido	
			D=20-40 L=10-30	
		0,25%vol MWCNT	0,50%vol MWCNT	
Densidade (ρ)	[kg/m ³]	1046	1048	1051
Calor específico (Cp)	[J/kg K]	3650	3644	3637
Viscosidade (μ)	[N s/m ²]	0,0024	0,0027	0,0028
Condutividade térmica (k)	[W/m K]	0,459	0,463	0,464

Capítulo 4 - Otimização e calibração da bancada de transferência de calor

Nesta secção é feita uma descrição de todo o processo de otimização efetuado na bancada experimental de transferência de calor. A otimização deste aparato tem como objetivo, capacitar o mesmo com uma maior área de ensaios, um permutador de calor mais eficiente e um controlo mais preciso do caudal do escoamento. Nesta secção também será apresentado a metodologia utilizada na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Recorrendo a um fluido base (30EG-70AD) o aparato experimental é calibrado, recorrendo a vários métodos de calibração de forma a garantir a fiabilidade dos ensaios efetuados. Posteriormente será calculado o seu erro experimental associado a bancada de ensaio otimizada.

4.1- Aparato experimental

Como o objetivo principal da presente tese é o estudo do coeficiente de transferência de calor em fluidos, sujeitos a escoamentos laminares de diferentes gamas, foi necessário otimizar o aparato experimental já montado *in situ* (Abreu (2010)). Este detinha algumas limitações as quais foi necessário promover uma total remodelação de modo a colmatar as mesmas: aumento do comprimento da zona de ensaio; aumento do número limitado de termopares para monitorização da temperatura no escoamento; a capacidade de arrefecimento do permutador de calor; e o controlo mais preciso do caudal do escoamento.

Desta forma, o presente trabalho prende-se essencialmente com o dimensionamento da nova zona de ensaios, de um novo permutador de calor, e a otimização de pequenos pormenores ao longo de todo o sistema. Assim, o novo aparato experimental é essencialmente constituído por um reservatório, uma bomba peristáltica, tubos de silicone e aço inoxidável, uma nova zona de ensaios, com monitorização de temperatura ao longo do tubo e um novo permutador de calor. Para garantir o bom funcionamento do aparato otimizado foram efetuados alguns cálculos durante o dimensionamento do permutador de calor, sendo também calculada a espessura mínima do isolante. Para o cálculo da espessura mínima de isolante, recorreu se a seguinte equação:

$$r_{\text{mínimo isolante}} = \frac{k_{\text{isolante}}}{h} \quad \text{Eq.(5)}$$

Onde k_{isolante} é a condutividade da la de rocha (0,041W/mK) e h o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Verificou-se que a espessura necessária para isolar o sistema é inferior a 1 mm. Desta forma foi garantido que o isolamento que possui um raio de 375 mm consegue isolar o sistema, não permitindo perdas de calor para o exterior.

Para o cálculo do comprimento do permutador de calor recorreu se a um balanço de energia ao permutador de forma a definir o comprimento necessário para arrefecer um fluido da temperatura de 308k até a temperatura de 293 K. Foi necessário inicialmente determinar a taxa de transferência de calor a transferir através da seguinte equação.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T_{f, in} - T_{f, out}) \text{ [W]} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde \dot{m} é o caudal mássico do fluido de arrefecimento, c_p o calor específico do fluido de arrefecimento e $T_{f, out}$ e $T_{f, in}$ as temperaturas saída e entrada do permutador de calor, respetivamente.

Após a determinação de taxa de transferência de calor procede se ao cálculo da área de superfície do permutador de calor através das seguintes equações.

$$\dot{Q} = h \times A_s \times (T_{f, out} - T_{f, in}) \text{ [W]} \quad \text{Eq.(7)}$$

Após o cálculo da área de superfície procede se ao cálculo do comprimento do permutador de calor através da seguinte equação.

$$A_s = \pi \times D \times L \text{ [m]} \quad \text{Eq.(8)}$$

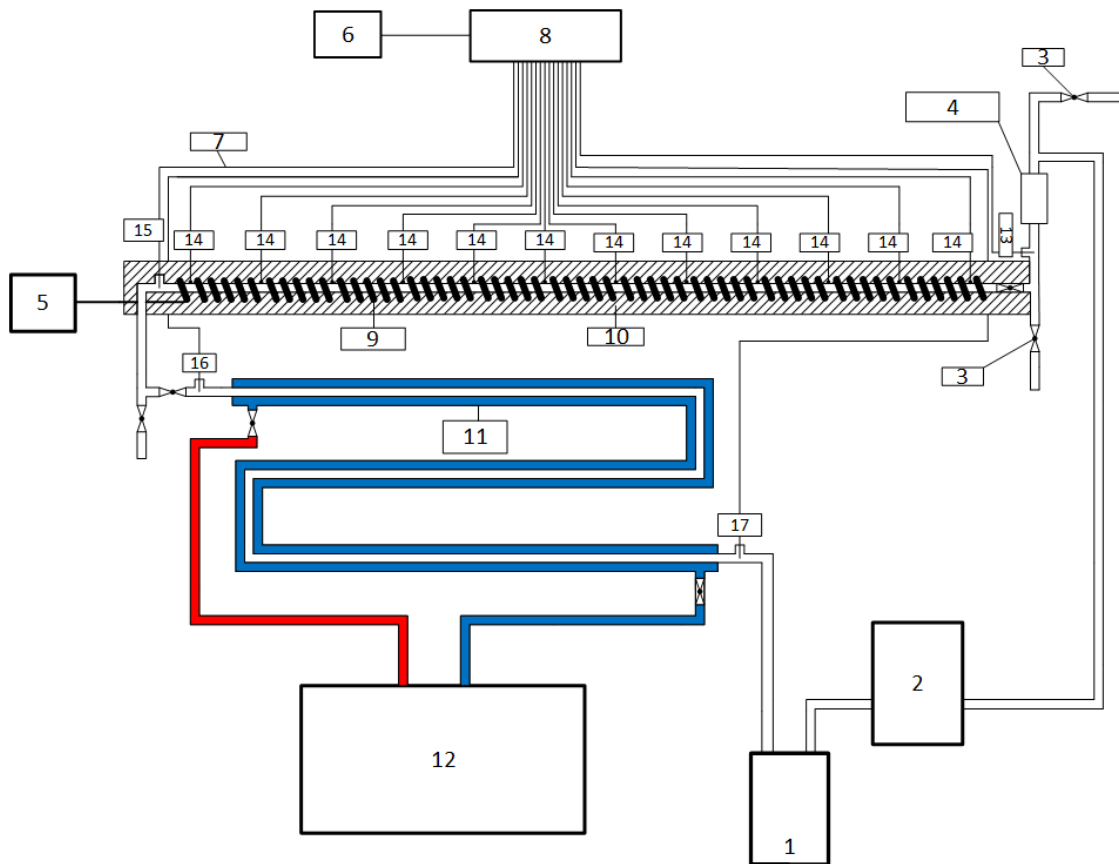
Onde D é o diâmetro do tubo e L o comprimento do tubo.

Verificou-se que para arrefecer os fluidos de testes da temperatura de 308 K ate a temperatura de 293 K é necessário um permutador com o comprimento mínimo de 2,5m. Os cálculos foram efetuados recorrendo as propriedades da Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo das propriedades inertes ao cálculo do comprimento mínimo do permutador de calor.

Fluido permutador de calor					
\dot{m} [kg/s]	c_p [J/kg K]	$T_{f, in}$ [K]	$T_{f, out}$ [K]	h [W/m ²]	D [m]
$2,2 \times 10^{-3}$	3250	20	35	1500	6×10^{-3}

Efetuada todos os cálculos inerentes a otimização do aparato experimental, recorreu se a componentes com medidas superiores a determinada por forma, a possibilitar a posterior utilização de diferentes fluidos em diferentes gamas de temperatura. Na Figura 7 esta representado um esquema do circuito experimental.



Legenda:

- | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1- Reservatório; | 7- Termopares; | 13- Termopar TH_IN; |
| 2- Bomba peristáltica; | 8- Sistema de aquisição de dados; | 14- Termopares de superfície; |
| 3- Válvula; | 9- Mangueira de aquecimento; | 15- Termopar TH_OUT; |
| 4- Reservatório; | 10- Isolante; | 16- Termopar TC_IN; |
| 5- Analisador de energia; | 11- Permutador de calor; | 17- Termopar TC_OUT; |
| 6- Computador; | 12- Banho térmico; | |

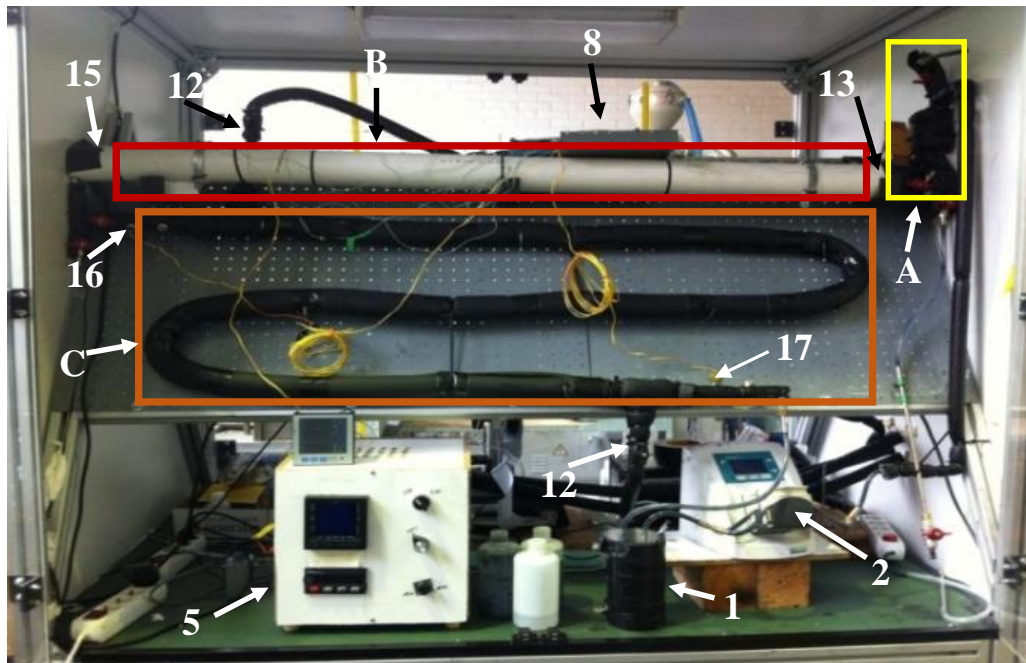
Figura 7 - Desenho esquemático do novo aparato experimental do sistema de transferência de calor por convecção.

O reservatório (1), em vidro com uma camada isolante externa para evitar perdas de calor, tem uma capacidade máxima de 1 litro. É neste reservatório que é colocado o fluido que se pretende estudar. Ligada ao reservatório, encontra-se uma bomba peristáltica (2) que permite bombear o fluido de forma controlada até um caudal máximo de 5000 mL/min com um erro de 0,1 mL/min.

O fluido após sair da bomba peristáltica entra na zona de ensaio que contém os seguintes componentes: um tubo de aço inoxidável com o comprimento de 1420 mm e diâmetro externo e interno de 8 e 6 mm, respetivamente; este tubo de inox está envolto numa mangueira de aquecimento (9) revestida em silicone com uma potência máxima de 500W e controlada por um analisador de energia (5); a mangueira está revestida por com lã rocha

(10), para permitir minimizar as perdas de calor. À entrada e à saída da zona de ensaios foram colocadas duas válvulas (3) e um reservatório (4) para permitir efetuar a purga de modo a evitar bolhas de ar e controlar o caudal de entrada. A zona de ensaios é monitorizada com 12 termopares de superfície (TS) (14), tipo K, permitindo uma monitorização em tempo real da temperatura ao longo de toda a zona de ensaios. Estes termopares estão distanciados entre si de 127 mm. Foram ainda colocados 2 termopares, um à entrada e outro à saída da zona de ensaios para monitorizar a temperatura de entrada (TH_IN) (13) e de saída (TH_OUT) (15) do tubo.

Finalmente, a zona de arrefecimento do fluido, que é constituída por um permutador de calor de duplo tubo (11) (um em aço inoxidável inserido num de borracha) e um banho (12) com capacidade de 2,2 kW permitindo variar a temperatura numa gama de temperaturas entre 248 e 423 K, utilizando como fluido operante o Kryto 30. Por forma a monitorizar a temperatura no permutador de calor, foram colocados dois termopares, um à entrada (TC_IN) (16) e outro à saída (TC_OUT) (17). Na Figura 8 mostra-se uma fotografia do aparato experimental utilizado para a execução do trabalho experimental.



Legenda:

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 – Reservatório | 12– Saída/ entrada banho térmico | 17- Termopar TC_OUT |
| 2 – Bomba peristáltica | 13 – Termopares TH_IN | A– Zona de controlo de caudal |
| 5 – Analisador de energia | 15- Termopar TH_OUT | B – Zona de teste |
| 8– Sistema de aquisição de dados | 16– Termopares TC_IN | C– Zona arrefecimento |

Figura 8 - Fotografia do aparato experimental.

Após efetuadas todas as alterações que foram propostas para a otimização do aparato experimental, foi comparado o atual aparato com o montado anteriormente *in situ* por Abreu (2010). Na Tabela 10 é possível verificar as principais alterações efetuadas que visam em melhorar o estudo da transferência de calor por convecção em fluidos.

Tabela 10 - Alterações efetuadas para a otimização do aparato experimental.

	Aparato experimental	Abreu (2010)
Número total de termopares	16	9
Número de termopares de superfície	12	5
Comprimento tubo	1420 mm	1200 mm
Diâmetro interno	6 mm	6 mm
Espaçamento entre termopares	127 mm	200 mm
Espessura isolamento	75 mm	30 mm
Comprimento permutador calor	3300 mm	860 mm
Sistema de purga	Sim	Não
Controlo do fluxo de calor	Sim	Não
Controlo de caudal	Sim	Não

4.2- Metodologia

Tendo sido feita uma descrição detalhada do aparato experimental, pretende-se agora descrever a metodologia utilizada para o estudo dos mecanismos de transferência de calor por convecção

A metodologia utilizada é a seguinte:

1. Calibrar os termopares através de *software* dedicado;
2. Verificar se o reservatório e o circuito se encontram completamente limpos;
3. Colocar a quantidade de, no mínimo, 500 ml de fluído no reservatório;
4. Ligar a bomba peristáltica e realizar uma purga de modo a eliminar as bolhas de ar, e possíveis impurezas, que possam existir no sistema.
5. Selecionar o regime de escoamento de funcionamento da bomba peristáltica através da introdução do caudal desejado;
6. Calibrar o caudal da bomba através do volume de calibração;
7. Verificar se todas as válvulas do circuito se encontram na posição correta;
8. Ligar o banho térmico colocar o fluído à temperatura desejada;
9. Ligar o analisador de energia e ajustar a potência necessária para o aquecimento;
10. Deixar funcionar o circuito durante, pelo menos, 30 min por forma a garantir a estabilidade do sistema;
11. Iniciar o registo de dados (intervalo de 2 s);
12. Validação dos resultados experimentais a partir da repetição da mesma experiência (com as mesmas condições), pelo menos 3 vezes.

4.3- Determinação da incerteza do aparato experimental

De modo a calibrar a bancada experimental, foi necessário proceder ao cálculo do erro associado ao sistema experimental. De forma a obter o erro associado ao coeficiente de transferência de calor por convecção foi usado a teoria da propagação de erro. A incerteza foi calculada com o auxílio do guia de incerteza de medida (Saudi Arabian Standards Organization. (2006)).

Desta forma, foi necessário definir as variáveis associadas ao seu cálculo e as incertezas dos equipamentos de medida. Na Tabela 11 estão apresentados as incertezas associadas a cada equipamento de medida necessário para o cálculo da incerteza. Os cálculos necessários para proceder à quantificação do erro experimental, serão representados de seguida.

Tabela 11 - Incertezas dos equipamentos de medida do aparato experimental.

$\delta\rho$	δL	δD	δP_o	δCp	δTs	δK	$\delta\mu$
[kg/m3]	[m]	[m]	[w]	[J/kg K]	[K]	[w/m K]	[Ns/m2]
50	1×10^{-3}	1×10^{-5}	10	150	0,2	1×10^{-2}	5×10^{-4}

Coefficiente de transferência de calor é definida pela lei de Newton de arrefecimento e é dada por:

$$h = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde q'' representa o fluxo total de calor na parede do tubo e $T_s(x)$ e $T_m(x)$ é a temperatura de superfície do tubo e a temperatura do fluido respetivamente. A incerteza para esta equação é dado por:

$$\delta h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial q''} \delta q''\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_s} \delta T_s\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_m} \delta T_m\right)^2} \quad \text{Eq.(10)}$$

No entanto, a fim de avaliar esta equação é necessário calcular as incertezas associadas ao fluxo de calor (q'') e às temperaturas (T_s e T_m). Estas devem ser derivadas de outras equações como se segue:

$$q'' = \frac{q}{A_s} \Leftrightarrow q'' = \frac{P_o}{\pi D_i L} \quad \text{Eq.(11)}$$

Onde P_o é a potência elétrica, D_i o diâmetro interno do tubo e L o comprimento do tubo.

A equação de incerteza para o fluxo de calor é dado por:

$$\delta q'' = \sqrt{\left(\frac{\partial q''}{\partial P_0} \delta P_0\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial D_i} \delta D_i\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial L} \delta L\right)^2} \quad \text{Eq.(12)}$$

A temperatura média do fluido na direção axial é definida por:

$$T_m = T_{in} + \frac{q''P}{\dot{m}c_p}(x) \quad \text{Eq.(13)}$$

Onde P é o perímetro interior do tubo, \dot{m} é o caudal mássico, C_p é o calor específico do fluido à temperatura de entrada, e (x) é o comprimento axial. A incerteza da temperatura média do fluido é definida como:

$$\delta T_m = \sqrt{\left(\frac{\partial T_m}{\partial q''} \delta q''\right)^2 + \left(\frac{\partial T_m}{\partial P} \delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial T_m}{\partial \dot{m}} \delta \dot{m}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_m}{\partial c_p} \delta c_p\right)^2} \quad \text{Eq.(14)}$$

O cálculo do perímetro e da sua incerteza pode se definido pelas seguintes equações:

$$P = \pi D_i L \quad \text{Eq.(15)}$$

$$\delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial D_i} \delta D_i\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial L} \delta L\right)^2} \quad \text{Eq.(16)}$$

O caudal mássico pode ser encontrado através da seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho Q \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde ρ é densidade do fluido e Q é o caudal volumétrico. A análise da incerteza do caudal mássico pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\delta \dot{m} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial Q} \delta Q\right)^2} \quad \text{Eq.(18)}$$

Uma vez que o o caudal mássico depende do caudal volumétrico, é necessário calcular a sua incerteza. As incertezas podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$Q = vA \Leftrightarrow Q = v \pi \frac{D_i^2}{4} \quad \text{Eq.(19)}$$

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial v} \delta v\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial D_i} \delta D_i\right)^2} \quad \text{Eq.(20)}$$

Para um correto cálculo da incerteza do caudal volumétrico é necessário proceder a cálculo da velocidade de escoamento:

$$v = \frac{Re \mu}{\rho D_i} \quad \text{Eq.(21)}$$

Onde Re é o número de Reynolds do escoamento, D_i o diâmetro interno do tubo, μ e ρ a viscosidade e a densidade do fluido a temperatura de entrada, respetivamente.

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial Re} \delta Re\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \mu} \delta \mu\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \rho} \delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial D_i} \delta D_i\right)^2} \quad \text{Eq.(22)}$$

Depois de calculada a incerteza do coeficiente de transferência de calor por convecção, pode se proceder ao cálculo do número de Nusselt através da seguinte equação:

$$Nu = \frac{h D_i}{k} \quad \text{Eq.(23)}$$

Em que k é a condutividade térmica do fluido e h o coeficiente de transferência de calor por convecção. A incerteza do numero de Nusselt é definida por:

$$\delta Nu = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial h} \delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D_i} \delta D_i\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k} \delta k\right)^2} \quad \text{Eq.(24)}$$

Depois de definidas todas as incertezas, procedeu-se ao cálculo da incerteza para cada termopar de superfície posicionado ao longo do tubo. Na Tabela 12 é apresentado o erro associado a cada termopar. É possível verificar um erro elevado para os primeiros 6 termopares de superfície, sendo justificado esse erro pela turbulência que se verifica a distâncias axiais menores, devindo a camada limite hidrodinâmica ainda se encontrar em desenvolvimento. Após o desenvolvimento do escoamento, é possível verificar que o erro é inferior a 20%.

Tabela 12 - Erro teórico do aparo experimental para o coeficiente de transferência de calor por convecção para os diferentes termopares em função do número de Reynolds.

Nº Reynolds	Termopar											
	Ts 1	Ts 2	Ts 3	Ts 4	Ts 5	Ts 6	Ts 7	Ts 8	Ts 9	Ts 10	Ts 11	Ts 12
1000	112%	99%	103%	58%	35%	33%	20%	17%	14%	12%	11%	10%
1200	103%	96%	87%	50%	33%	29%	24%	20%	17%	16%	14%	20%
1400	91%	88%	73%	46%	30%	27%	22%	19%	17%	16%	14%	17%
1600	87%	83%	71%	44%	28%	26%	21%	18%	16%	15%	14%	19%
1800	95%	87%	66%	41%	26%	24%	20%	17%	15%	14%	13%	18%
2000	94%	70%	63%	39%	24%	23%	19%	16%	14%	13%	12%	21%

4.4- Calibração experimental

A calibração experimental é um passo fundamental na otimização de qualquer sistema, pois permite determinar a precisão e fiabilidade dos resultados obtidos. De forma a assegurar a fiabilidade e aumentar a confiança no aparato experimental, serão adquiridas as temperaturas de superfície do tubo, que permitem o cálculo do coeficiente de calor experimental, sendo posteriormente comparado com valor determinado teoricamente.

Previamente à montagem dos termopares nos seus devidos locais foi verificado se todos estavam a funcionar e se o valor medido se encontrava dentro do erro associado a termopares do tipo K ($\pm 0, 2K$). Após verificar o funcionamento de todos os termopares, foi realizada uma calibração com o intuito de averiguar a fiabilidade das medições, a diferentes temperaturas (273K, 288K, 303K, 318K e 333K). Os resultados obtidos estão representados na Figura 9, pela análise do gráfico dessa figura é possível verificar que o desvio máximo dos valores adquiridos pelos termopares, relativamente ao valor da temperatura do banho térmico esta dentro do erro associado ($\pm 0, 2K$). A tracejado encontra-se representado o erro ($\pm 0, 2K$) associado a cada temperatura adquirida, observando-se que para a gama de temperaturas de funcionamento do aparato experimental (288 a 318K) os termopares se encontram calibrados. A monitorização dos termopares foi efetuada através de um módulo de aquisição de dados e do seu *software* de aquisição de dados de modo a garantir a eliminação de qualquer erro induzido pelo *software* ou *hardware*.

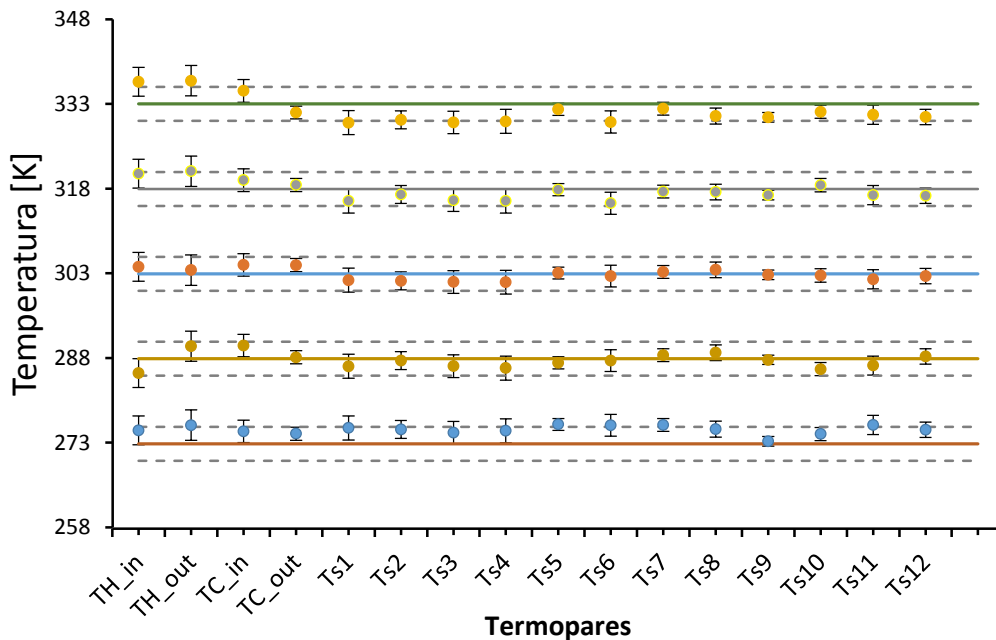


Figura 9 - Valores experimentais adquiridos pelos termopares quando sujeitos a diferentes temperaturas.

Após a calibração dos termopares, estes foram colocados nas devidas posições, distanciados de 127mm ao longo do tubo, como indicado na Figura 7.

Os próximos parágrafos serão dedicados à descrição dos processos de calibração efectuados após a montagem do aparato experimental.

As primeiras experiências têm como objectivo verificar a estabilidade do aparato experimental e dos sensores de temperatura distribuídos ao longo do sistema experimental. Com os equipamentos que compõem o sistema experimental desligados, foram novamente verificados os valores de temperatura registados pelos termopares, de modo averiguar se durante a montagem dos mesmos tinha havido algum problema. Como é possível aferir pela Figura 10, os valores registados apresentam um desvio-padrão inferior a 1%, estando representado a tracejado o erro ($\pm 0,2 K$) associados aos termopares do tipo K, podendo-se comprovar assim, o bom funcionamento dos termopares no sistema experimental.

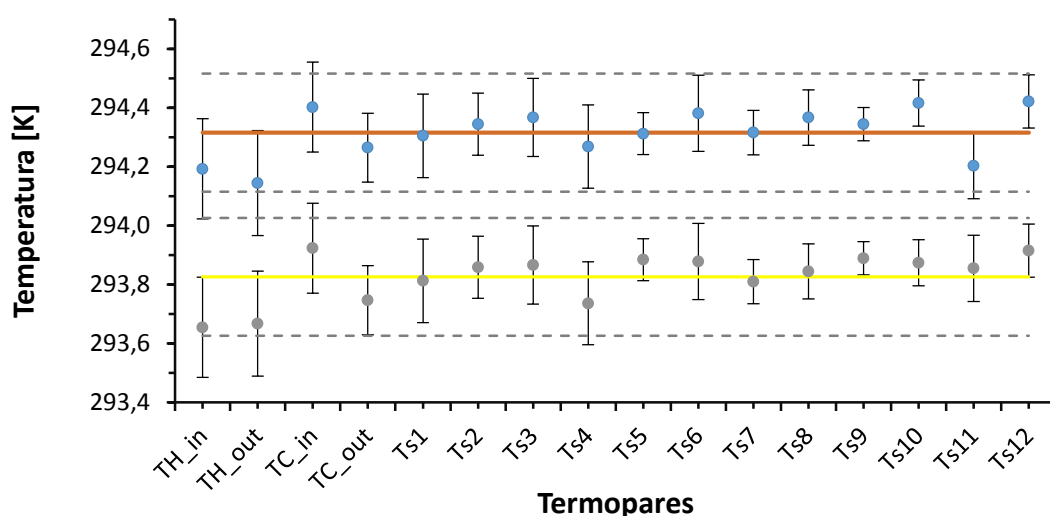


Figura 10 - Temperatura adquiridas pelos termopares devidamente posicionados ao longo do tubo (no aparato experimental).

Posteriormente procedeu-se à averiguação da estabilidade dos termopares quando submetidos a escoamentos com diferentes números de Reynolds. A água destilada foi o fluido escolhido para efetuar estes testes iniciais, essencialmente devido ao seu baixo custo. Assim, somente com a bomba peristáltica a bombear o fluido, e após o sistema estabilizar, foram adquiridas as temperaturas para os diferentes escoamentos. Na Figura 11 estão apresentados os valores das temperaturas de superfície do tubo quando este é sujeito a escoamentos com o número de Reynolds de 1000 e 2000. O erro associado para esta calibração é inferior a 3%, correspondendo a uma variação média de $\pm 0,2 K$ (representada a tracejado), que se situa no intervalo de erro dos instrumentos de medida.

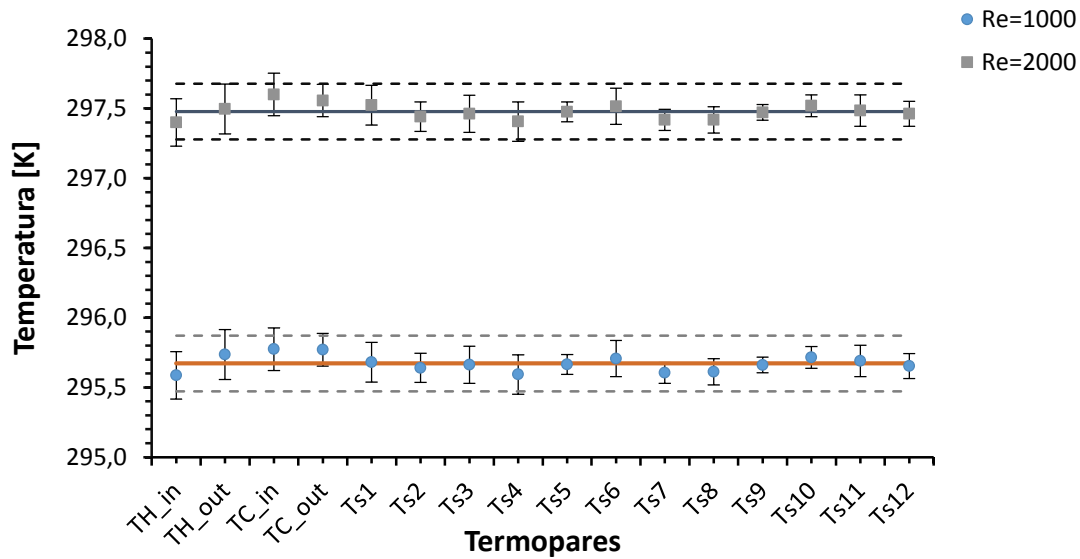


Figura 11 - Temperaturas adquiridas para os termopares posicionados ao longo do tubo para diferentes números de Reynolds, sem fluxo de calor.

Após efetuadas 5 experiências, para cada número de Reynolds (1000, 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000) compreendidos no regime laminar, iniciou-se a calibração do sistema experimental para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção. As experiências foram efetuadas utilizando o fluido base considerado na preparação do nanofluido (30EG-70AD), como fluido operante. A utilização desta mistura prende-se com o facto de estes já serem utilizados em sistemas de permuta de calor, e devido as suas propriedades termo-físicas serem bem conhecidas. Com base nas medidas da temperatura de superfície, temperatura de entrada e saída do fluido, fluxo de calor e caudal, foi determinado o respetivo coeficiente de transferência de calor por convecção, através as correlações matemáticas descritas de seguida.

Taxa total de transferência de calor

$$q = \dot{m} \times c_p \times (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad [\text{W}] \quad \text{Eq.(25)}$$

Em que \dot{m} é o caudal do fluido, C_p é o calor específico do fluido e $T_{f,out}$, $T_{f,in}$ são as temperaturas de saída e de entrada, respetivamente.

Fluxo de calor

$$q'' = \frac{q}{A_{sup}} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Eq.(26)}$$

Em que $A_{sup} = \pi \times D \times L [m^2]$, é a área de superfície de transferência de calor.

Coefficiente de transferência de calor por convecção experimental

$$h_{exp} = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad [\text{W/m}^2 \text{K}] \quad \text{Eq.(27)}$$

Onde $T_s(x)$ é a temperatura da superfície ao longo da direção axial e $T_m(x)$ é a temperatura média do fluido ao longo da direção axial.

Temperatura média do fluido ao longo da direção axial

$$T_m(x) = T_{m,in} + \frac{q'' \times P}{\dot{m} \times c_p} x \quad [\text{K}] \quad \text{Eq.(28)}$$

Sendo x é a distância axial e P o perímetro do tubo.

Número de Nusselt

$$Nu_{exp} = \frac{h_{exp}(x) \times D_i}{k} \quad \text{Eq.(29)}$$

Onde D_i é o diâmetro interno e k é a condutividade térmica do fluido.

Posteriormente os valores obtidos do coeficiente de transferência de calor por convecção foram comparados com valores teóricos, recorrendo-se às seguintes correlações:

Equação de Shah para o número de Nusselt

$$Nu(x) = 1,953 \times (Re \times Pr \times \frac{D_i}{x})^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq.(30)}$$

Sendo Pr o número de Prantl e Re o número de Reynolds.(Shah (1975))

Número de Reynolds

$$Re = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times D \times \mu} \quad \text{Eq.(31)}$$

Número de Prantl

$$Pr = \frac{c_p \times \mu}{k} \quad \text{Eq.(32)}$$

As propriedades dos fluidos necessários para o cálculo das correlações anteriores estão representadas na Tabela 8.

Foram realizadas outras experiências por forma a garantir confiança no aparato experimental. Uma vez que a superfície do tubo tem propriedades adiabáticas, a taxa à qual a energia é gerada no interior do tubo deve ser igual à taxa na qual é transferida por convecção (q) para o fluido. Desta forma, efetuou-se um balanço de energia do sistema (Eq.33), com o intuito de comparar as temperaturas experimentalmente obtidas com as previstas pela equação 34 com base nos seguintes pressupostos: o calor transferido por condução na parede do tubo é desprezado; o fluxo de calor é constante ao longo do tubo com uma potência de 130W; e o sistema está bem isolado logo as perdas para o ambiente são desprezáveis.

$$\sum \dot{E}_{sistema} = q + q'' = 0 \quad \text{Eq.(33)}$$

$$q = q''$$

$$\Delta T_{sistema} = \frac{q}{m_f \times c_p} \quad \text{Eq.(34)}$$

A partir da análise da Tabela 13, pode-se verificar que, o sistema encontra-se bem calibrado, apresentando um diferença máxima entre o intervalo de temperaturas teórico e experimental de 0,2K, este erro esta dentro do erro associado aos termopares instalados ($\pm 0, 2K$).

Tabela 13- Variação das temperaturas experimentais para diferentes números de Reynolds.

Nº Reynolds	Caudal	Calor específico	ΔT Teórico	ΔT Experimental	ΔT
(Re)	(\dot{m})	(c_p)	(T_{teo})	(T_{exp})	($T_{out} - T_{in}$)
	[kg/s]	[J/kgK]	[K]	[K]	[K]
1000	$1,2 \times 10^{-2}$	3651	276,1	276,1	0,0
1200	$1,4 \times 10^{-2}$	3651	275,6	275,7	0,1
1400	$1,6 \times 10^{-2}$	3651	275,2	275,4	0,2
1600	$1,9 \times 10^{-2}$	3651	274,9	275,1	0,2
1800	$2,1 \times 10^{-2}$	3651	274,7	274,9	0,2
2000	$2,3 \times 10^{-2}$	3651	274,5	274,7	0,2

A última calibração efetuada foi a variação do número Nusselt e do coeficiente de transferência de calor por convecção ao longo da distância axial do tubo para vários números de Reynolds. Os resultados obtidos são posteriormente comparados com os previstos pela equação de Shah (Eq.(26)). Na Figura 12 é apresentada a comparação entre os valores teóricos e experimentais para o escoamento de Re=2000, os restantes escoamentos encontram se em anexo (Figura A.1 a A.5).

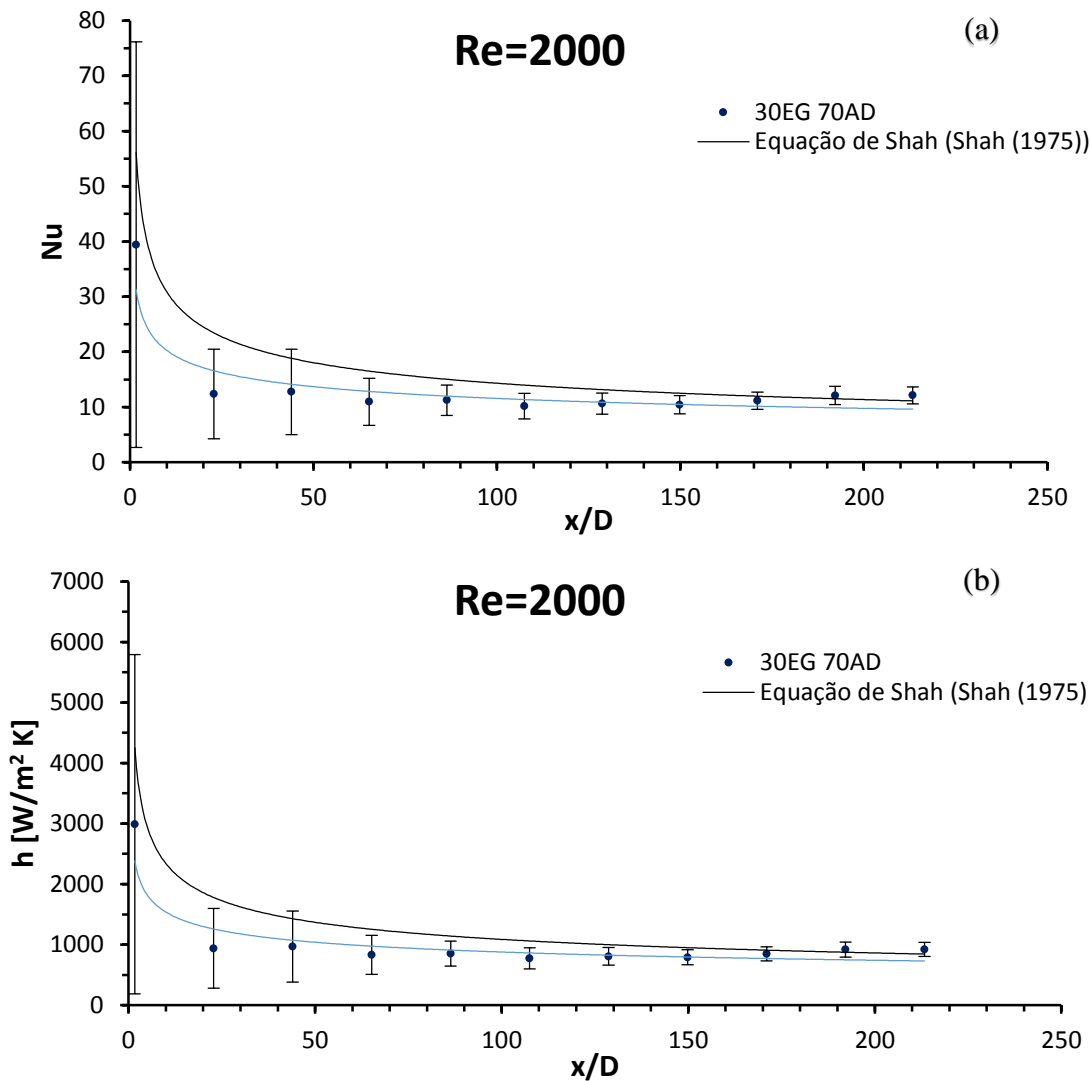


Figura 12 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para Re=2000.

Através da análise da Figura 12 e pelas restantes figuras em anexo (Figura A.1 a A.5), pode se concluir que os valores obtidos experimentalmente se encontram muito próximos dos valores teóricos previstos pela equação de Shah. O número de Nusselt (gráfico (a)) apresenta um erro máximo de 94% para o termopar colocado no início do tubo para distância de $x/D = 1,67$ e 14% para o termopar colocado na zona final do tubo com a distância de $x/D=172$. Por sua vez, o coeficiente de transferência de calor (gráfico (b)) apresenta um erro máximo de 94% para distância $x/D = 1,67$ e de 14% para o termopar colocado a distância $x/D=172$. A diminuição do erro ao longo do comprimento do tubo deve se ao desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica de entrada, $L_h = 0,05 \times Re \times D$ para um regime laminar. Comparado este aparato experimental, com o desenvolvido por Abreu (2010), é possível verificar que houve uma diminuição do erro experimental de 30% para 15% para a distância axial de 172 e Re=2000.

Após a calibração experimental da bancada foi necessário garantir a repetibilidade dos resultados obtidos. A repetibilidade é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, da mesma grandeza, efetuados nas mesmas condições. (Çengel et al. (2009))

Na Figura 13 estão representados os resultados obtidos que demonstram a repetibilidade do aparato experimental para o cálculo do coeficiente de calor por convecção ao longo do tubo. Foram realizados 4 testes para cada escoamento, por forma a aumentar a fiabilidade do equipamento. Todos os restantes procedimentos experimentais foram mantidos inalteráveis.

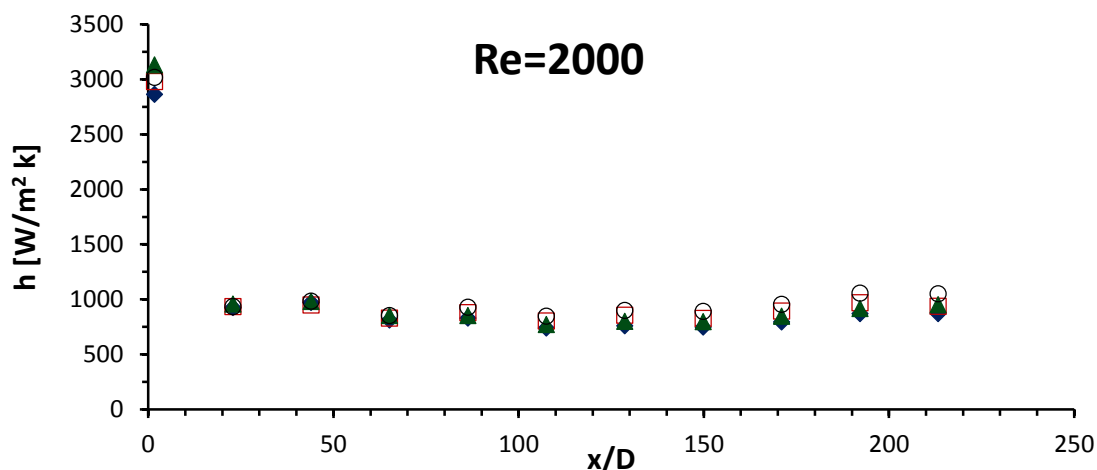


Figura 13 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, com $Re=2000$.

Pela análise ao gráfico da Figura 13 e das figuras em anexo (Figura A.6 e A.7) verifica-se que os resultados, para os 4 testes realizados, são idênticos, sendo possível afirmar que o aparato experimental possui um índice de repetibilidade superior a 85%, para todos os escoamentos testados.

4.5- Quantificação da inercia térmica de condução

O aparato experimental foi calibrado tendo por base a equação de Shah para um fluxo de calor constante em regime laminar. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor experimental e posteriormente o número de Nusselt, é mais correto considerar a temperatura de superfície interna, devido a resistência térmica do tubo. No entanto, foi considerado a temperatura de superfície externa, devido aos termopares se encontrarem instalados na superfície externa do tubo. Verificando-se uma diferença entre estas duas temperaturas, é necessário recorrer ao cálculo da resistência térmica do tubo (Figura 14) por forma a calcular a temperatura de superfície interna. Através da equação 31 é possível efetuar o cálculo da resistência térmica e posteriormente o cálculo da temperatura de superfície interna, de forma a corrigir as temperaturas necessárias para os cálculos do número de Nusselt e do coeficiente de transferência de calor experimentais. (Abreu et al. (2013))

A resistência do tubo pode ser calculada por:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} \quad \text{Eq.(35)}$$

Onde R_{t1} é a resistência de contacto e R_{t2} a resistência de condução do tubo.

Desta forma o fluxo de calor é dado por:

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} \quad \text{Eq.(36)}$$

Em que ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície parede interna e externa do tubo.

Assim, pode –se determinar a temperatura superfície da parede interna.

$$T_{Sup_Int} = T_S - q'' \times R_t \quad \text{Eq.(37)}$$

Sendo T_S a temperatura de superfície da parede externa do tubo.

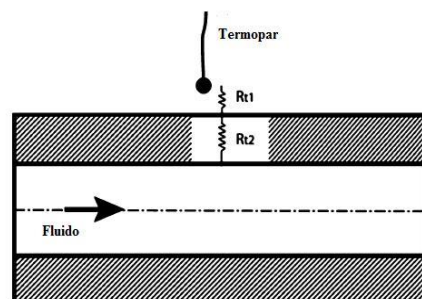


Figura 14 - Representação da resistência térmica entre o termopar e o caudal.

O procedimento de correção de temperatura realizado consiste na determinação da diferença de temperaturas ($T_{Sup_Int} - T_S$), sendo posteriormente aplicado o valor de correção ao termopar correspondente. Para cada um dos regimes de escoamento para cada termopar instalado. A Figura 15 mostra o coeficiente de transferência de calor do fluido base após a correção.

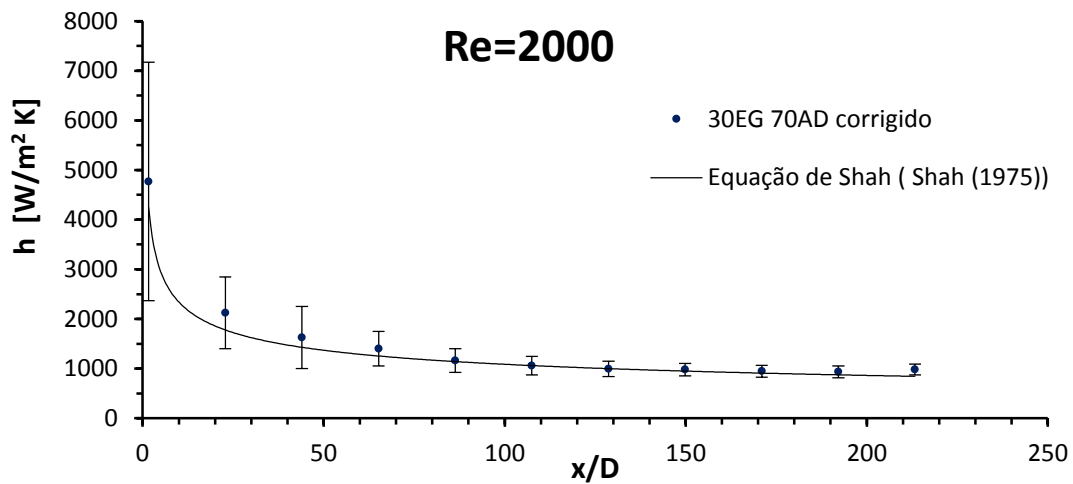


Figura 15 - Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial, para Re=2000, após correção da inércia térmica de condução.

Analisando o gráfico da Figura 15 que apresenta os valores experimentais após ser efetuada a correção da temperatura de superfície considerada na equação de Shah, é possível verificar que os valores do coeficiente de transferência de calor experimentais se encontram relativamente próximos dos valores obtidos pela equação de Shah para o fluido base.

Capítulo 5 - Análise dos mecanismos de transferência de calor por convecção em nanofluidos

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor por convecção, para os diferentes fluidos em análise, sujeitos a um fluxo de calor constante. Estas experiências têm como objetivo averiguar a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção em função do número de Reynolds e igualmente estudar o efeito da adição de MWCNTs na capacidade do fluido em transferir calor. Com este intuito, foram escolhidos seis escoamentos, em regime laminar, com números de Reynolds compreendidos entre 1000 e 2000, com incrementos de 200.

5.1- Comparação dos valores experimentais para diferentes posições axiais

Os efeitos da variação do número de Reynolds no coeficiente de transferência de calor por convecção em duas posições axiais, $x/D = 23$ e $x/D = 172$, estão representados na Figura 16, sendo ocultado o erro experimental por forma a facilitar a visualização. O erro associado a estes termopares em anexo (Tabela A.1). A escolha destas posições prende-se com a intenção de estudar a transferência de calor em duas zonas distintas do escoamento. A primeira zona, a zona de entrada, no qual o escoamento ainda se encontra em desenvolvimento e a segunda zona na zona final do tubo, onde o escoamento se encontra totalmente desenvolvido. Ao analisar os gráficos da Figura 16 (a) e (b) é possível concluir que o coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta à medida que o caudal aumenta, como seria esperado. Verifica-se igualmente que o nanofluido com 0,50% vol MWCNT apresenta um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção de 87% para $x/D = 23$ e 8,5% para o $x/D = 172$, para um número de Reynolds de 2000. Este comportamento deve-se ao desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica. Resultados semelhantes foram obtidos por Ding et al.(2006) que estudaram a transferência de calor em nanofluidos contendo MWCNTs. Estes autores justificam este aumento devido a redução da espessura da camada limite com a presença de nanopartículas, ou seja um atraso no desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica leva a que o coeficiente de transferência seja mais elevado na zona de desenvolvimento comparativamente com o fluido base, devido ao nanofluido necessitar de uma maior distância axial para se desenvolver. Anoop et al. (2009b) justifica o atraso do desenvolvimento da camada limite devido ao movimento Browniano, que consiste no movimento aleatório de partículas macroscópicas num fluido

como consequência dos choques das moléculas do fluido nas nanopartículas, provocando uma melhoria do coeficiente de transferência de calor.

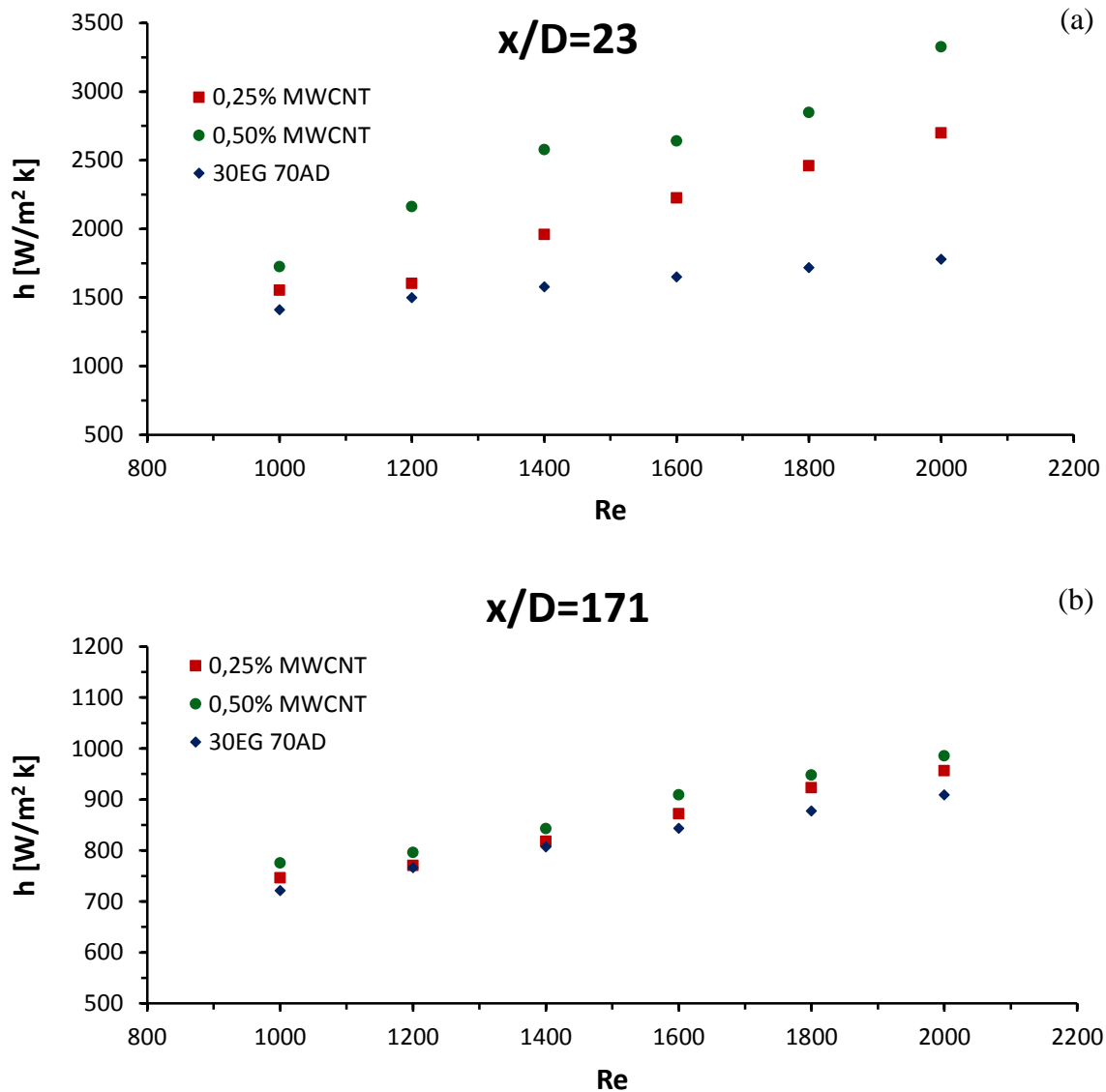


Figura 16 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base, para distâncias axiais de $x/D=23$ (a) e $x/D=171$ (b) em função do número de Reynolds.

Na Figura 17 esta representado o coeficiente de transferência de calor em função do escoamento (Re), para os fluidos estudados e para a posição axial $x/D = 192$, foi ocultada a representação do erro experimental por forma a facilitar a visualização, (Tabela A.1). A escolha deste termopar, na região desenvolvida da camada limite hidrodinâmica deve-se ao facto de que em sistemas de permuta reais, os fluidos se encontrarem frequentemente em funcionamento nesta situação. Verifica-se que a medida que o número de Reynolds aumenta, o coeficiente de transferência de calor também aumenta. O aumento do coeficiente de calor à medida que o número de Reynolds aumenta, foi também observado por Abreu et al. (2013) para nanofluidos de MWCNT/água com uma concentração de nanopartículas de 0,25% vol e 0,50% vol. Contudo apresentaram aumentos para o coeficiente de transferência de calor por

convecção de 23% e 47%, respetivamente. Outra conclusão que se pode retirar é o facto da presença de MWCNTs aumentar a transferência de calor por convecção, sendo possível verificar um aumento máximo de 6,3% e de 13,8% para os nanofluidos compostos por 0,25% vol e 0,50% vol de MWCNTs, respetivamente para a posição $x/D=192$ e para o número de Reynolds de 2000.

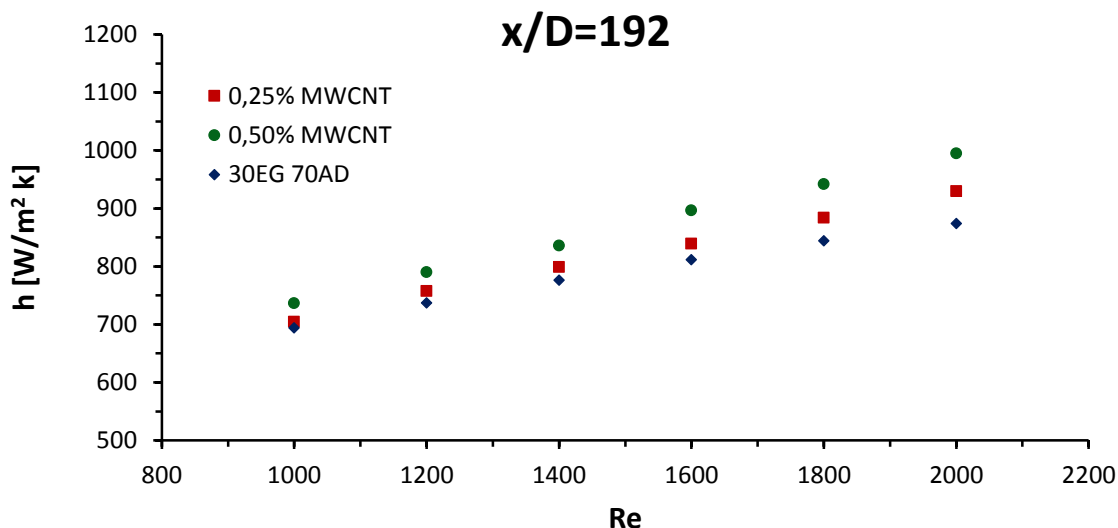


Figura 17 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=192$.

5.2- Comparação dos valores experimentais do coeficiente de transferência de calor por convecção

Os efeitos da variação do coeficiente de transferência de calor por convecção ao longo das posições axiais, para os diferentes escoamentos foram analisados, encontrando-se na Figura 18 a representação do coeficiente de transferência de calor por convecção em função da posição (x/D), para o escoamento de $Re=2000$ (os restantes encontram-se em anexo (Figura A.11 e A.12)), sendo ocultado o erro experimental por forma a facilitar a visualização, encontrando-se em anexo (Tabela A.1) o erro associado ao escoamento de $Re=2000$.

Analisando o gráfico da Figura 18, é possível verificar um aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento da concentração de nanopartículas, tendendo para um valor constante na região desenvolvida da camada limite hidrodinâmica.

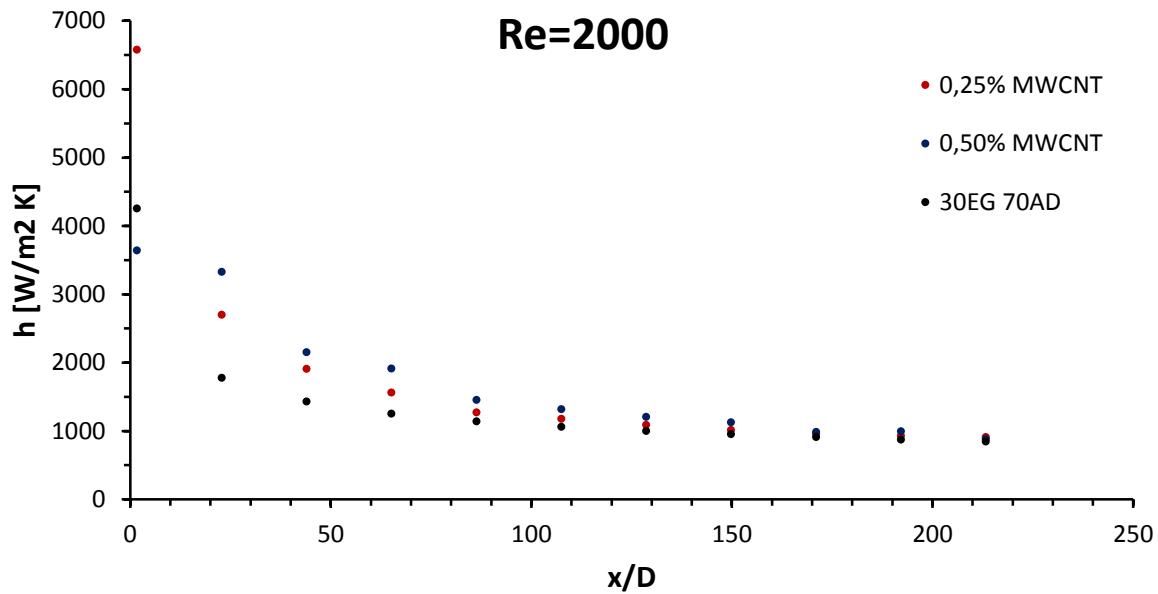


Figura 18 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=2000$.

Pode – se concluir que os aumentos são superiores para a distância axial inferior, sendo bastante elevadas em comparação com o fluido base. Estudando a camada limite hidrodinâmica é possível verificar que para a menor distancia axial o fluido ainda se encontra na região de desenvolvimento da camada limite, e na posição axial de maior valor o fluido já se encontrar na região completamente desenvolvida da camada limite. Quando o fluido se encontra na posição axial $x/D = 0$, teoricamente o coeficiente de transferência de calor tenderia para infinito, diminuído com o aumento da distância axial. Este facto justifica o valor elevado para coeficiente de transferência de calor em posições axiais próximas de zero. Não justificando o elevado aumento do coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação aos fluidos base.

Analisando o coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação ao fluido base para distância $x/D = 192$, foi possível verificar, através dos resultados obtidos e representados na Figura 19, que o aumento do coeficiente de transferência de calor aumenta com o aumento da concentração de nanopartículas. Resultados semelhantes foram obtidos por Amrollahi et al. (2010) que estudaram a transferência de calor em tubos contendo nanofluidos compostos MWCNT/água. Mostrando a influência da concentração de nanopartículas no aumento da transferência de calor.

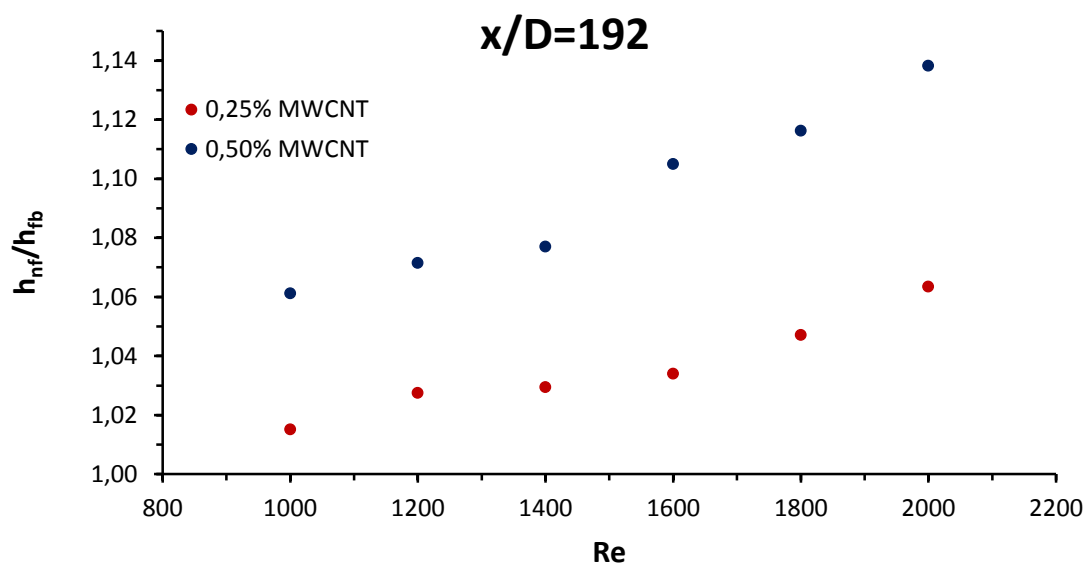


Figura 19 - Coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos em relação ao fluido em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=192$;

Comparando os resultados da condutividade térmica do gráfico da Figura 5 apresentado no capítulo 3, com os resultados obtidos para os diferentes escoamentos pode se verificar que o aumento da transferência de calor por convecção é mais significativo quando comparado com o aumento da condutividade térmica. Conclui-se assim que o aumento da transferência de calor não se deve só ao aumento da condutividade térmica. Heyhat et al. (2013) observou o mesmo efeito para nanofluidos de Al_2O_3 /água em escoamentos desenvolvidos, justificando esse aumento ao movimento Browniano. Outros autores tais como Lamas et al. (2013) e Abreu et al. (2013) que estudaram nanofluidos contendo MWCNTs, observaram também o mesmo efeito tendo justificado o aumento do coeficiente de transferência de calor devido ao facto de os MWCNTs apresentarem uma baixa concentração de transição para percolação. Esta concentração permite definir a capacidade que as nanopartículas tendem em formar uma rede de contínua ao longo do fluido base. Verificando –se que os nanotubos de carbono apresentam uma melhor distribuição espacial em relação as outras nanopartículas esféricas, contribuindo para um maior aumento da condução de calor, segundo a teoria clássica de (Maxwell et al. (1891)) e consequentemente para uma transferência de calor por convecção mais eficaz.

5.3- Comparação dos valores experimentais e teóricos do Número de Nusselt

O número de Nusselt representa o aumento de transferência de calor através de uma camada de fluido devido ao resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda a camada (Çengel (2009)). Ou seja, a transferência de calor por convecção é mais eficaz para número de Nusselt elevados. Para números de Nusselt próximos de 1, o fluido apresenta uma transferência de calor através de condução pura. Deste modo, foram calculados os números de Nusselt para todos os escoamentos em função da distância axial. Na Figura 20 está representado um gráfico do número de Nusselt em função da distância axial (x/D) para um número de Reynolds de 2000 (para os restantes números de Reynolds ver anexo (Figura A.12 e A13)), sendo ocultado o erro experimental por forma a facilitar a visualização. O erro associado ao escoamento de $Re=2000$ encontra-se em anexo (Tabela A.1).

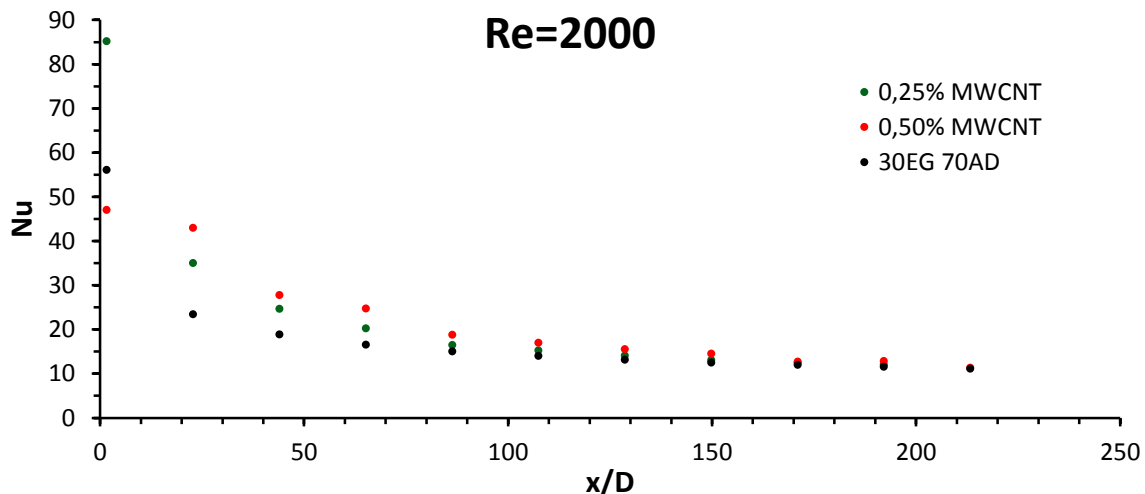


Figura 20 - Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=2000$.

A Figura 20 mostra claramente um aumento do número de Nusselt com a adição de nanopartículas de MWCNTs, sendo um aumento mais significativo na região de entrada da camada limite hidrodinâmica, cerca de 84%, e menor na região completamente desenvolvida da camada limite hidrodinâmica sendo o seu valor máximo de 12%, para o número de Reynolds de 2000 com concentração de 0,50% vol MWCNTs. Para a menor concentração de MWCNTs (0,25% vol) os valores máximos obtidos foram 49% e 5% para região de entrada e região completamente desenvolvida respetivamente.

Comparando os resultados experimentais com os previstos pela equação de Shah para os dois nanofluidos testados, pode-se concluir que esta consegue prever o número de Nusselt dos nanofluidos com um erro máximo de 7% para a zona em que o escoamento se encontra desenvolvido. Na Figura 21, está representado uma comparação entre os resultados experimentais do número de Nusselt em função da posição axial (x/D), com o teórico

previsto por Shah, para (a) nanofluidos com 0,25% vol MWCNTs e para o (b) nanofluido com 0,50% vol MWCNTs. Como se pode verificar, tanto para o nanofluido com 0,25% vol de MWCNTs como para o nanofluido com 0,50% de MWCNTs, a equação de Shah consegue descrever perfeitamente, para zona em que o escoamento se encontra desenvolvido, os resultados experimentais dos nanofluidos. Não conseguiu prever para distâncias axiais próximas de zero devido a tubulencia que se observa em zonas em que o escoamento se encontra em desenvolvimento.

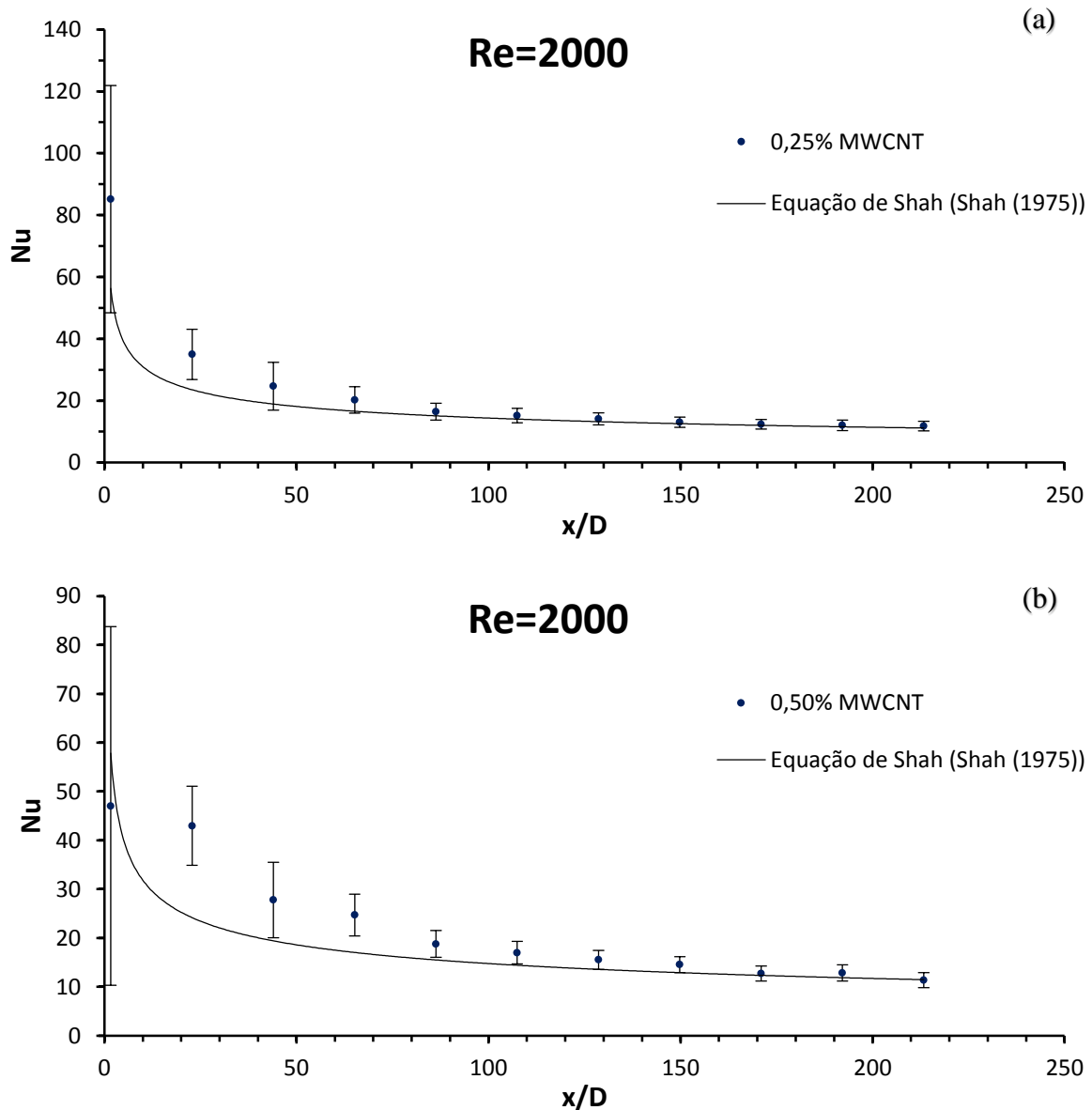


Figura 21 - Número de Nusselt para os nanofluidos de 0,25% vol MWCNT (a) e 0,50% vol MWCNT (b) em função da distância axial, para Re=2000

Capítulo 6 - Conclusões e trabalhos futuros

A necessidade de encontrar fluidos que sejam mais eficientes do ponto de vista termo-físico e o desenvolvimento da nanotecnologia, fomentam a preparação de suspensões de nanopartículas em fluidos de permuta convencionais. A adição de nanopartículas, tais como nanotubos de carbono em fluidos de permuta permite melhorar as propriedades termo-físicas dos fluidos base, aumentando dessa forma o desempenho dos permutadores de calor.

Com o objetivo de estudar a transferência de calor em nanofluidos, foi otimizada uma bancada experimental para aferir os mecanismos de transferência de calor para qualquer sistema de permuta. Essa otimização consistiu em aumentar a zona de teste, sendo colocados um número de termopares de superfície superior, ao que se encontravam anteriormente instalados. Foi também levado em conta as perdas de calor para o meio ambiente, reforçando o isolamento da zona de teste. Com as alterações efetuadas foi possível uma redução de 15% do erro experimental comparativamente com o aparato experimental previamente montado no local. A bancada experimental foi calibrada tendo sido observado a repetibilidade dos resultados com um erro inferior a 16% para o regime laminar. Devido às limitações da bomba peristáltica não foi possível estudar escoamentos turbulentos. As nanopartículas foram tratadas quimicamente para posteriormente serem adicionadas ao fluido base para preparação de dois nanofluidos com concentrações de 0,25% vol e 0,50% vol de MWCNTs. O fluido base é constituído por uma mistura de 30%EG e 70%AD, que é comumente utilizado como fluido de refrigeração. Depois de garantida a sua estabilidade coloidal foram efetuados vários testes para diferentes números de Reynolds, por forma a obter as temperaturas de superfície do tubo e posteriormente calcular o coeficiente de calor para os diferentes nanofluidos. O fluido escoava através de um tubo com um diâmetro de 6 mm interno e com um fluxo de calor médio constante de 130W, para diferentes números de Reynolds (1000-2000) compreendidos no regime laminar. Para aferir as propriedades de transferência de calor por convecção foi necessário caracterizar os nanofluidos quanto à sua condutividade térmica, viscosidade, calor específico e densidade.

Foi possível observar 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. Verificando-se um aumento da transferência de calor à medida que o número de Reynolds aumenta.

Comparando o aumento de condutividade térmica (1,2%) com o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção (13,8%), do nanofluido de maior concentração face ao fluido base, verifica-se que o aumento da transferência de calor não se deve exclusivamente ao aumento da condutividade térmica. Os resultados apresentados são semelhantes aos encontrados na bibliografia. As principais razões apontadas para justificar

esse aumento é o facto de os MWCNTs 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 encontrado para justificar este aumento é o movimento Browniano, que devido aos MWCNTs apresentarem uma estrutura alongada, irá permitir um maior aumento de colisões entre as nanopartículas e as moléculas do fluido base.

É possível concluir através dos resultados observados, o facto da equação do número de Nusselt de Shah conseguir descrever perfeitamente os resultados experimentais com um erro de 7% para a zona em que o escoamento se encontra desenvolvido. Não sendo necessário recorrer a equações desenvolvidas com o intuito de estudar a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Os resultados obtidos neste trabalho são encorajadores para a continuidade do estudo de transferência de calor por convecção em nanofluidos constituídos por nanotubos de carbono, com concentrações de nanopartículas mais elevadas e com diferentes geometrias. Seria também interessante a substituição da bomba peristáltica por uma com maior caudal volumétrico que permitisse o estudo de nanofluidos com MWCNTs em regimes turbulentos. Devido a ter sido comprovada a estabilidade coloidal dos nanofluidos estudados, seria muito interessante iniciar um estudo num sistema de permuta real utilizando um nanofluido como refrigerante de forma a verificar se seria viável a sua aplicação.

Bibliografia

- Abreu, B.A.S., 2010. Caracterização de nanofluidos do ponto de vista da termo-físico, Aveiro. *Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro*.
- Abreu, Bruno; Lamas, B. & Fonseca, A.; Martins, N.; Oliveira, M.S. a. ., 2013. Experimental characterization of convective heat transfer with MWCNT based nanofluids under laminar flow conditions. *Heat and Mass Transfer*.
- Akoh, Hiroshi; Yukihiro, Tsukasaki; Yatsuya, Shigeki; Tasaki, A., 1978. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 45(0), pp.495–500.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, I., 2009. ASHRAE Handbook - Fundamentals. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, pp.978–1–933742–54–0.
- Amrollahi, A; Rashidi, A M; Lotfi, R; Emami Meibodi, M; Kashefi, K., 2010. 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*, 37(6), pp.717–723.
- Anoop, K.B., Sundararajan, T. & Das, S.K., 2009a. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(9–10), pp.2189–2195.
- Anoop, K.B., Sundararajan, T. & Das, S.K., 2009b. Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration. *Journal of Applied Physics*, 106(3), pp.34907–34909.
- Bachelor, G.K., 1977. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *J. Fluidmech*, 83, pp.97–117.
- Bhattacharya, P; Saha, S K; Yadav, A; Phelan, P E; Prasher, R.S., 2004. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 95(11), pp.6492–6494.
- Brinkman, H.C., 1952. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), p.571.
- Çengel, Y.A., 2009. *Transferência de calor e massa* 3ª edição. McGrawHill, ed.,
- Chen, Haisheng; Ding, Yulong; He, Yurong; Tan, C., 2007. Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids. *Chemical Physics Letters*, 444(4–6), pp.333–337.

- Chen, Haisheng; Yang, Wei; He, Yurong; Ding, Yulong; Zhang, Lingling; Tan, Chunqing; Lapkin, Alexei A; Bavykin, D.V., 2008. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids). *Powder Technology*, 183(1), pp.63–72.
- Choi, S., E.J., 1995. Enhancing Thermal Conductivity of Nanofluids with nanoparticles.
- Chopkar, M., Das, P.K. & Manna, I., 2006. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. *Scripta Materialia*, 55(6), pp.549–552.
- Ding, Yulong; Alias, Hajar; Wen, Dongsheng; Williams, R.A., 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(1–2), pp.240–250.
- Duangthongsuk, W. & Wongwises, S., 2010. 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*, 53(1–3), pp.334–344.
- Eastman, J A; Choi, U S; Li, S; Thompson, L J; Lee, S., 1996. Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids. *MRS Online Proceedings Library*, 457.
- Einstein, A., 1956. Investigations on the Theory of the Brownian Movement. *Dover Publications, Inc., New York*.
- Esmailzadeh, E.; Almohammadi, H.; Nasiri Vatan, Sh.; Omrani, A.N., 2013. Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics of γ -Al₂O₃/water under laminar flow inside a horizontal tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 63, pp.31–37.
- Esumi, K., 1996. No Chemical treatment of carbon nanotubesTitle. *Carbon* 34, pp.279–281.
- Garg, Paritosh; Alvarado, Jorge L; Marsh, Charles; Carlson, Thomas A; Kessler, David A; Annamalai, K., 2009. 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*, 52(21–22), pp.5090–5101.
- Gopalan, R. & Narayan, P., 2011. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), p.334.
- Habibzadeh, Sajjad; Kazemi-Beydokhti, Amin; Khodadadi, Abbas Ali; Mortazavi, Yadollah; Omanovic, Sasha; Shariat-Niassar, M., 2010. Stability and thermal conductivity of nanofluids of tin dioxide synthesized via microwave-induced combustion route. *Chemical Engineering Journal*, 156(2), pp.471–478.

- Haddad, Zoubida; Abid, C. & Oztop, Hakan F.; Mataoui, A., 2013. A review on how the researchers prepare their nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 76, pp.168–189.
- Hamilton, C., 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *I&EC Fundam*, 1, p.182e191.
- Harkirat, 2010. Preparation and characterization of nanofluids and some investigation in biological applications. *Master of Technology in Chemical Engineering, Thesis Report Thapar University, Patiala*;
- He, Yurong; Jin, Yi; Chen, Haisheng; Ding, Yulong; Cang, Daqiang; Lu, H., 2007. 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*, 50(11–12), pp.2272–2281.
- Heyhat, M M; Kowsary, F; Rashidi, A M; Momenpour, M H; Amrollahi, A., 2013. Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed flow regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44(0), pp.483–489.
- Huang, Jin; Wang, Xianju; Long, Qiong; Wen, Xueyi; Zhou, Yunjin; Li, L., 2009. Influence of pH on the Stability Characteristics of Nanofluids. *Photonics and Optoelectronics, 2009. SOPO 2009. Symposium on*, pp.1–4.
- Hwang, K.S., Jang, S.P. & Choi, S.U.S., 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1–2), pp.193–199.
- Hwang, Y; Park, H S; Lee, J K; Jung, W.H., 2006. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6, Supplem(0), pp.e67–e71.
- Indhuja A.; Suganthi K.S.; Manikandan S.; Rajan K.S.;2013. Viscosity and thermal conductivity of dispersions of gum arabic capped MWCNT in water: Influence of MWCNT concentration and temperature. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(3), pp.474–479.
- Jahanshahi, M; Hosseinizadeh, S F; Alipanah, M; Dehghani, A; Vakilinejad, G.R., 2010. Numerical simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using Water/SiO₂ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6), pp.687–694.
- Kim, H.J., Bang, I.C. & Onoe, J., 2009. Characteristic stability of bare Au-water nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(5), pp.532–538.

- Kitano, T., Kataoka, T. & Shirota, T., 1981. An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers. *Rheologica Acta*, 20(2), pp.207–209.
- Krieger, I.M. & Dougherty, T.J., 1959. A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, 3(1), pp.137–152.
- Kumaresan, V. & Velraj, R., 2012. Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. *Thermochimica Acta*, 545, pp.180–186.
- Lamas, Bruno C.; Fonseca, A.;Gonçalves, F. a. M.M. et al., 2011. EG/CNTs Nanofluids Engineering and Thermo-Rheological Characterization. *Journal of Nano Research*, 13, pp.69–74.
- Lamas, Bruno; Abreu, Bruno; Fonseca, Alexandra; Martins, Nelson; mOliveira, M., 2013. Long-Term MWCNTs Nanofluids toward Heat Transfer Capability Improvement. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(24), pp.12826–12834.
- Lamas, Bruno; Abreu, Bruno; Fonseca, Alexandra; Martins, Nelson; Oliveira, M., 2012. Assessing colloidal stability of long term MWCNT based nanofluids. *Journal of colloid and interface science*, 381(1), pp.17–23.
- Lamas, Bruno; Abreu, Bruno; Fonseca, Alexandra; Martins, Nelson; Oliveira, M., 2013. Numerical analysis of percolation formation in carbon nanotube based nanofluids. , (June), pp.257–270.
- Lee, Ji-Hwan; Hwang, Kyo Sik; Jang, Seok Pil; Lee, Byeong Ho; Kim, Jun Ho; Choi, Stephen U S; Choi, C.J., 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11–12), pp.2651–2656.
- Leong, K.C., Yang, C. & Murshed, S.M.S., 2006. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. *Journal of Nanoparticle Research*, 8(2), pp.245–254.
- Li, Q. & Xuan, Y., 2002. Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Science in China Series E: Technological Science*, 45(4), pp.408–416.
- Liu, M.-S. et al., 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(9), pp.1202–1210.
- Maiga S E B, Nguyen C T, Galanis N, Roy G, Mare T, C.M., 2006. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension. *International Journal Numerical Methods Heat Fluid Flow*, 16, pp.275–92.

- Maxwell, J.C., 1891. A Treatise on Electricity and Magnetism. unabridged. *third ed. Clarendon Press, Oxford, UK.*
- Meng, Zhaoguo; Wu, Daxiong; Wang, Liangang; Zhu, Haitao; Li, Q., 2012. Carbon nanotube glycol nanofluids: Photo-thermal properties, thermal conductivities and rheological behavior. *Particuology*, 10(5), pp.614–618.
- Moraveji, Mostafa Keshavarz; Darabi, Mehdi;Haddad, Seyyed Mohammad Hossein; Davarnejad, R., 2011. Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(9), pp.1291–1295.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C. & Yang, C., 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(5), pp.560–568.
- Namburu, Praveen K; Das, Debendra K; Tanguturi, Krishna M; Vajjha, R.S., 2009. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(2), pp.290–302.
- Namburu, Praveen K; Kulkarni, Devdatta P; Misra, Debasmita; Das, D.K., 2007. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), pp.397–402.
- Nelson, I.C., BANERJEE, D. & PONNAPPAN, R., 2009. Flow Loop Experiments Using Polyalphaolefin Nanofluids. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 23(4), pp.752–761.
- Nguyen CT, Desgranges F, Galanis N, Roy G, Mare T, B.S., 2008. Viscosity data for Al₂O₃/water nanofluid-hysteresis: Is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International Journal of Thermal Sciences*, 47, pp.103–11.
- Pak, B.C. & Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170.
- Paul, G., Pal, T. & Manna, I., 2010. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, 349(1), pp.434–437.
- Phuoc, T.X., Massoudi, M. & Chen, R.-H., 2011. Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(1), pp.12–18.
- Pradhan, N R; Duan, H; Liang, J; Iannacchione, G.S., 2009. The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 20(24), p.245705.

- Rea, Ulzie; McKrell, Tom; Hu, Lin-wen; Buongiorno, J., 2009. 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), pp.2042–2048.
- Saidur, R., Leong, K.Y. & Mohammad, H. a., 2011. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), pp.1646–1668.
- Saudi Arabian Standards Organization, 2006. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurent. , pp.1– 137.
- Shah K R, 1975. Thermal entry length solutions for the circular tube and parallel plates, Proceedings of third national heat and mass transfer conference. *Indian Institute of Technology, Bombay*, 1, pp.11–75.
- Su, F., Ma, X. & Lan, Z., 2011. The effect of carbon nanotubes on the physical properties of a binary nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(2), pp.252–257.
- Sundar LS, Ramanathan S, Sharma KV, B.P., 2007. Temperature dependent flow characteristics of Al₂O₃ nanofluid. *Int J Nanotechnol Appl*, 1, pp.35–44.
- Sundar Syam L; Naik, M.T. & Sharma, K V; Singh, M K; Siva Reddy, T.C., 2012. Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 37(0), pp.65–71.
- Suresh, S; Venkataraj, K P; Selvakumar, P; Chandrasekar, M., 2012. Effect of Al₂O₃–Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38(0), pp.54–60.
- Timofeeva, Elena V; Yu, W. & France, David M; Singh, Dileep; Routbort, J.L., 2011. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol. *Journal of Applied Physics*, 109(1), pp.14914–14915.
- Vajjha, R.S. & Das, D.K., 2012. 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*, 55(15-16), pp.4063–4078.
- Vajjha, R.S. & Das, D.K., 2009a. Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison With Theory. *Petroleum Science and Technology*, 27(6), pp.612–624.
- Vajjha, R.S. & Das, D.K., 2009b. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22), pp.4675–4682.
- Vajjha, R.S. & Das, D.K., 2009c. Specific Heat Measurement of Three Nanofluids and Development of New Correlations. *Journal of heat transfer*, 131(7).

- Vajjha, R.S., Das, D.K. & Kulkarni, D.P., 2010. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(21–22), pp.4607–4618.
- Wagener, M., Murty, B.S. & Günther, B., 1996. Preparation of Metal Nanosuspensions by High-Pressure DC-Sputtering on Running Liquids. *MRS Online Proceedings Library*, 457.
- Wen, D. & Ding, Y., 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24), pp.5181–5188.
- Xie H, Chen L, W.Q., 2008. Measurements of the viscosity of suspensions (nanofluids) containing nanosized Al₂O₃ particles. *High Temperatures-High Pressures*, 37, pp.127–35.
- Xuan, Y. & Li, Q., 2003. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125(1), p.151.
- Xuan, Y. & Roetzel, W., 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), pp.3701–3707.
- Xue, Q.Z., 2005. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. *Physica B: Condensed Matter*, 368(1–4), pp.302–307.
- Yang, Y. et al., 2005. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6), pp.1107–1116.
- Yousefi, T.; Shojaeizadeh, E.; Veysi, F.; Zinadini, S., 2012. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. *Solar Energy*, 86(2), pp.771–779.
- Yu, W. & Choi, S.U.S., 2003. The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(1/2), pp.167–171.
- Yu, Wei, Xie, Huaqing; Chen, Lifei; Li, Y., 2010a. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 355(1–3), pp.109–113.
- Yu, Wei, Xie, Huaqing; Chen, Lifei; Li, Y., 2010b. Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Powder Technology*, 197(3), pp.218–221.
- Zeinali Heris, S., Etemad, S.G. & Nasr Esfahany, M., 2006. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(4), pp.529–535.

Zhou LP, Wang BX, Peng XF, Du XZ, Y.Y., 2010. On the specific heat capacity of CuO nanofluid. *Adv Mech Eng* 2010, pp.1–4.

Zhu, H., Lin, Y. & Yin, Y., 2004. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), pp.100–103.

Anexos

Erro experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção

Tabela A.1- Erro experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção para os diferentes termopares em função do número de Reynolds

Nº Reynolds	Termopar											
	Ts1	Ts2	Ts3	Ts4	Ts5	Ts6	Ts7	Ts8	Ts9	Ts10	Ts11	Ts12
1000	112%	99%	102%	59%	36%	34%	21%	17%	14%	13%	11%	11%
1200	103%	96%	85%	50%	33%	29%	24%	20%	17%	16%	14%	20%
1400	91%	88%	71%	45%	29%	27%	23%	19%	17%	16%	13%	17%
1600	87%	83%	68%	43%	29%	25%	21%	18%	16%	15%	13%	18%
1800	95%	87%	67%	41%	26%	23%	19%	17%	15%	14%	13%	17%
2000	94%	70%	61%	39%	24%	23%	18%	16%	14%	14%	13%	21%

Número de Nusselt e coeficiente de transferência de calor em função da distância axial

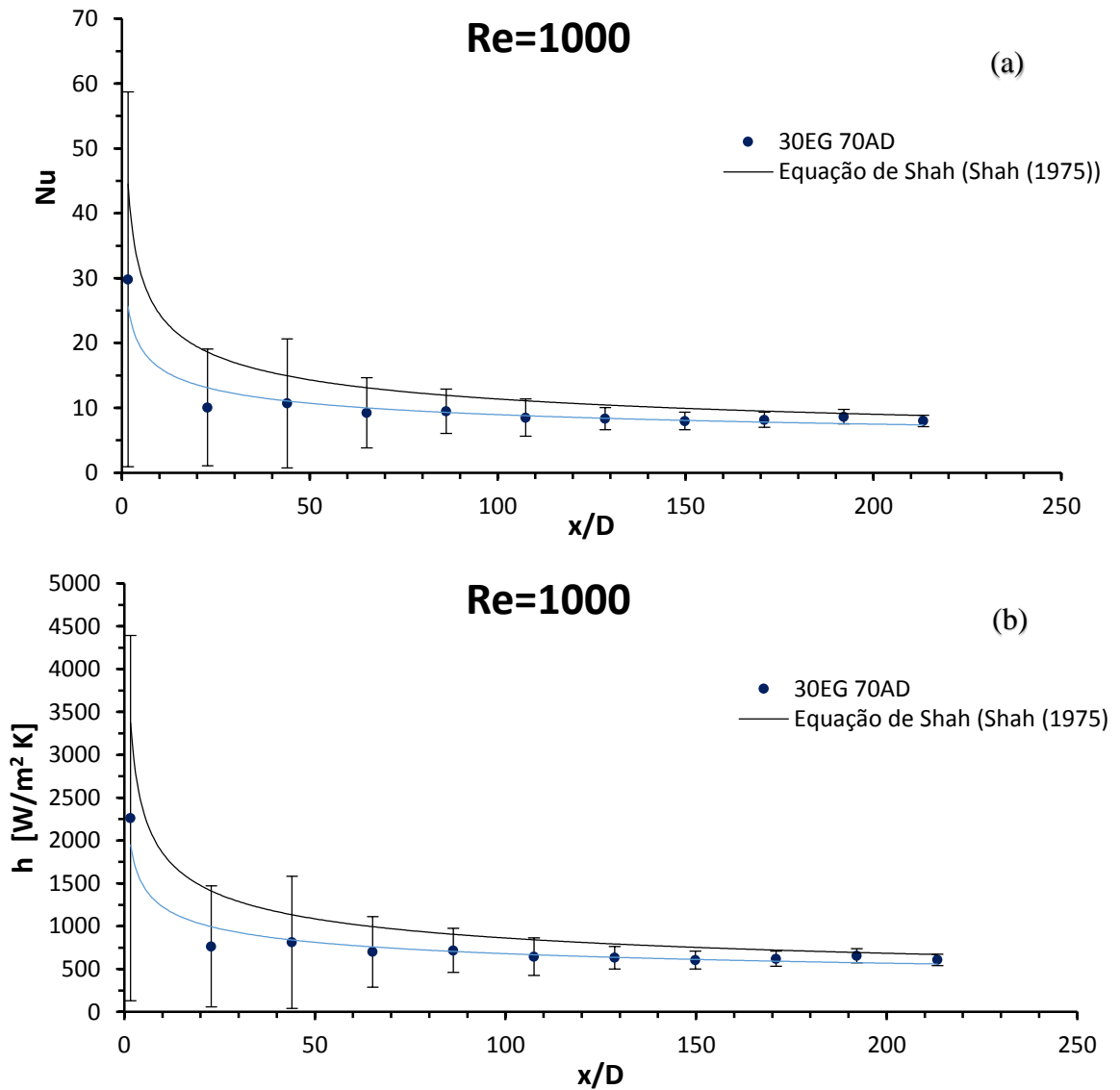
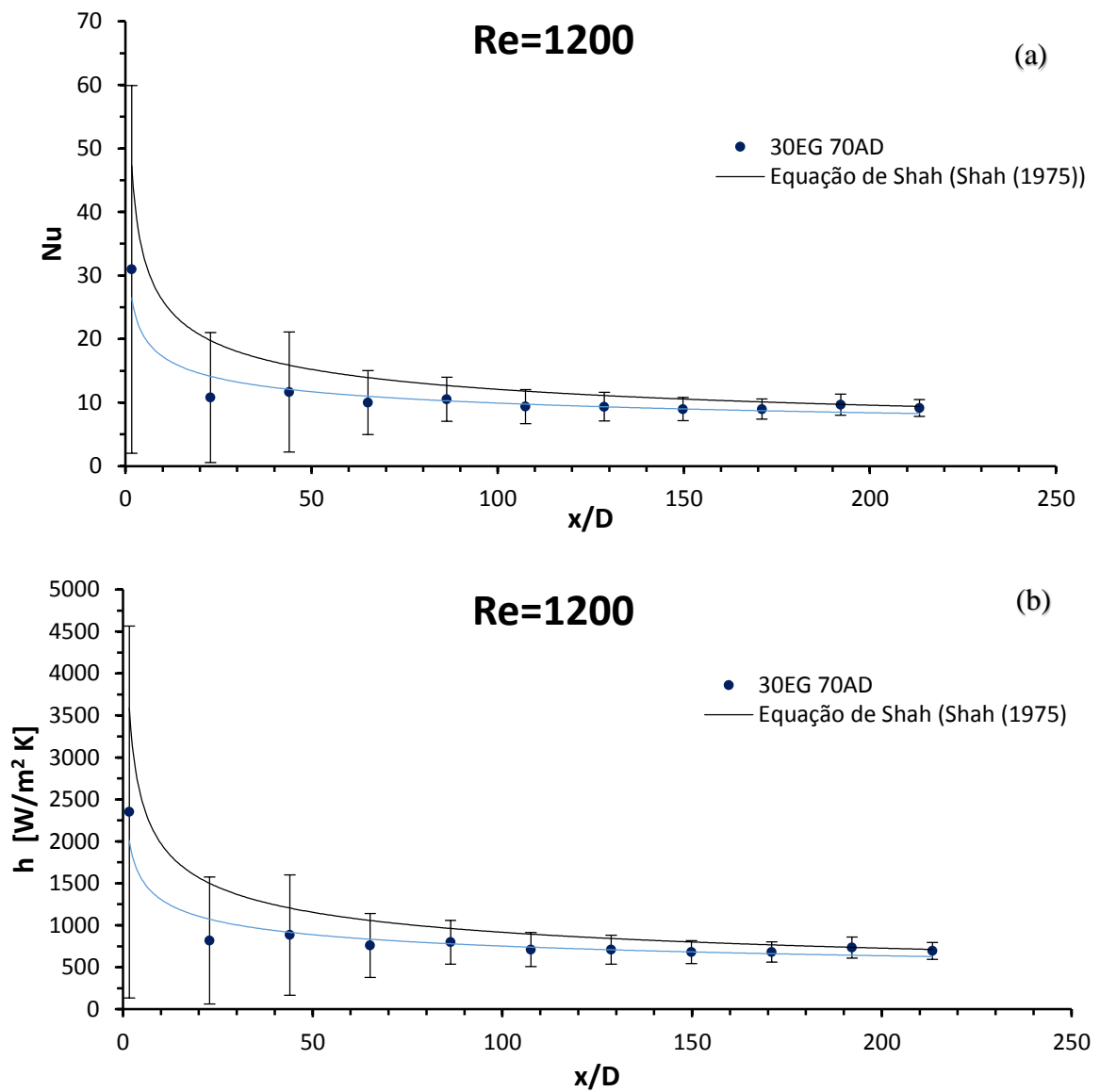


Figura A.1 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para Re=1000.

Figura A. 2 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1200$.

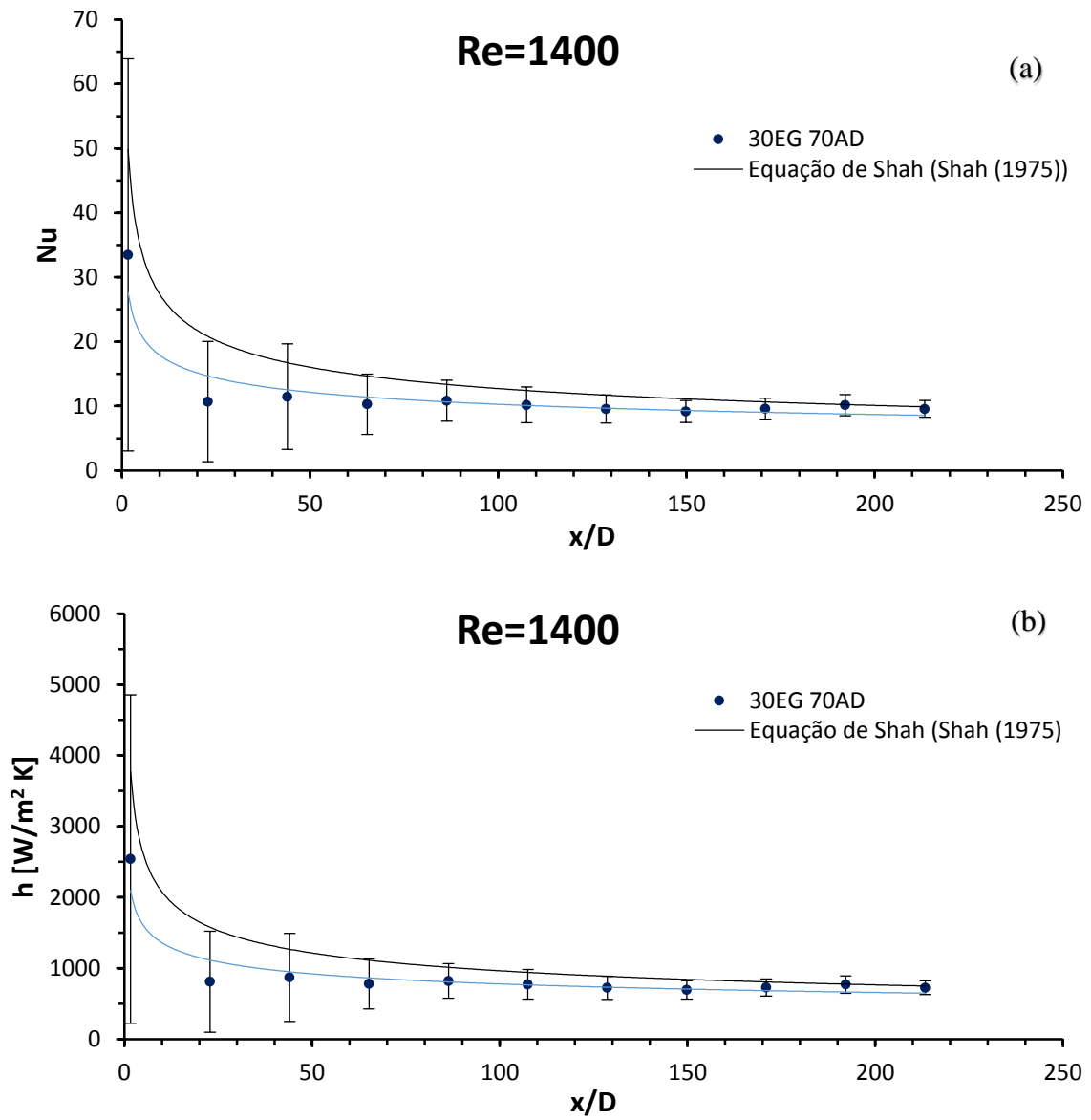


Figura A. 3 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para Re=1400.

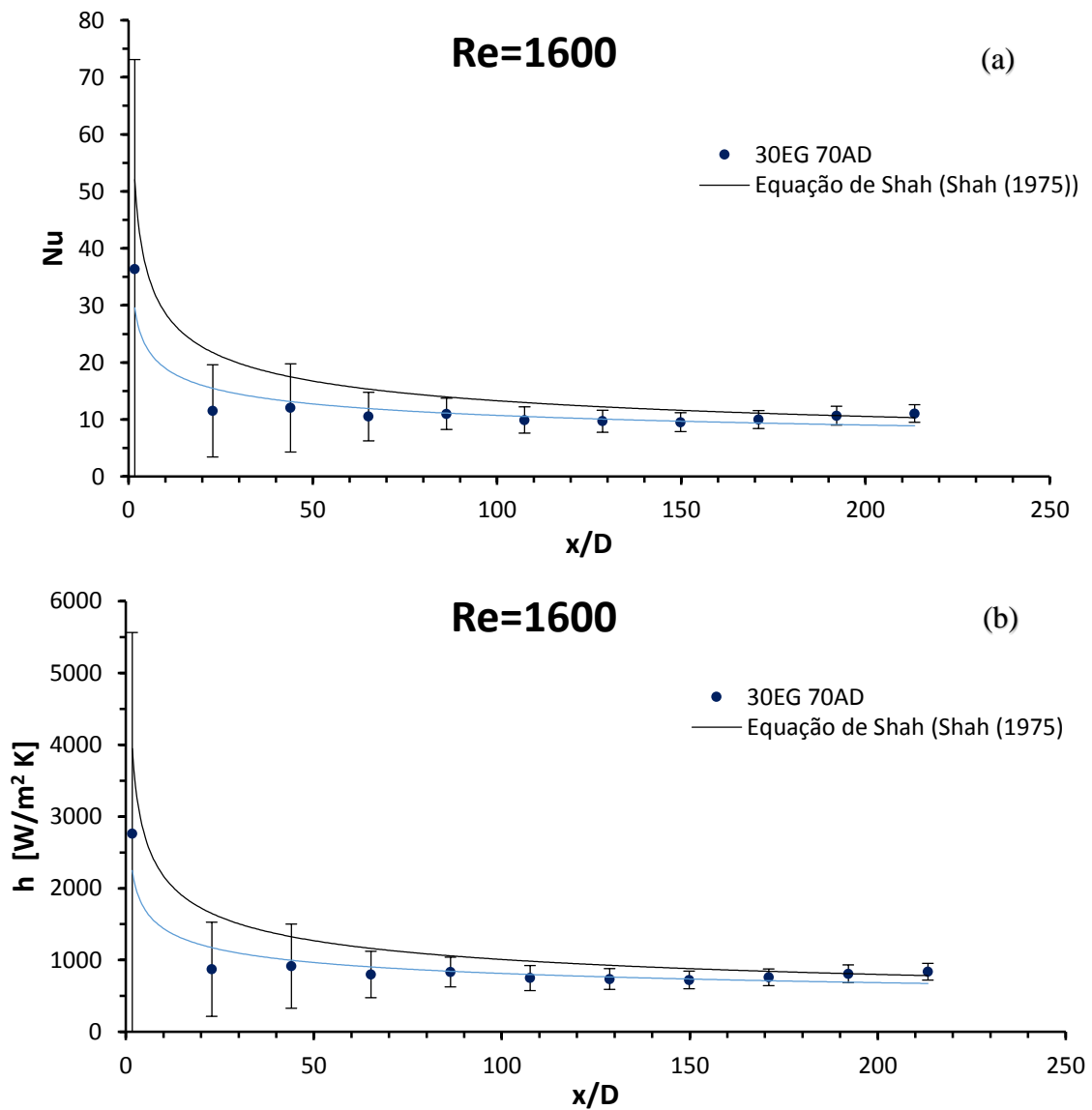


Figura A. 4 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para $Re=1600$.

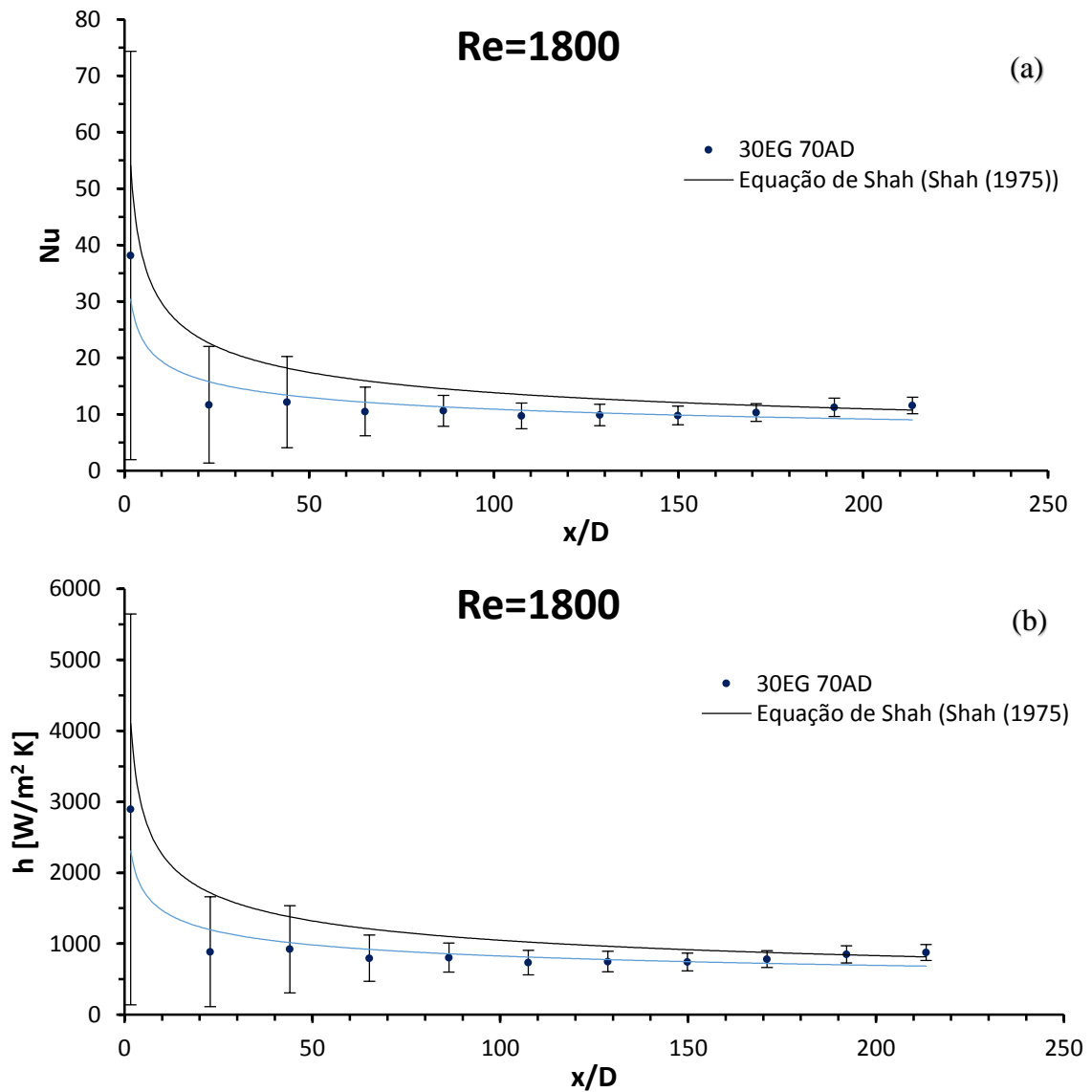


Figura A. 5 - Número de Nusselt (a) e coeficiente de transferência de calor (b) em função da distância axial, para Re=1800.

Repetibilidade

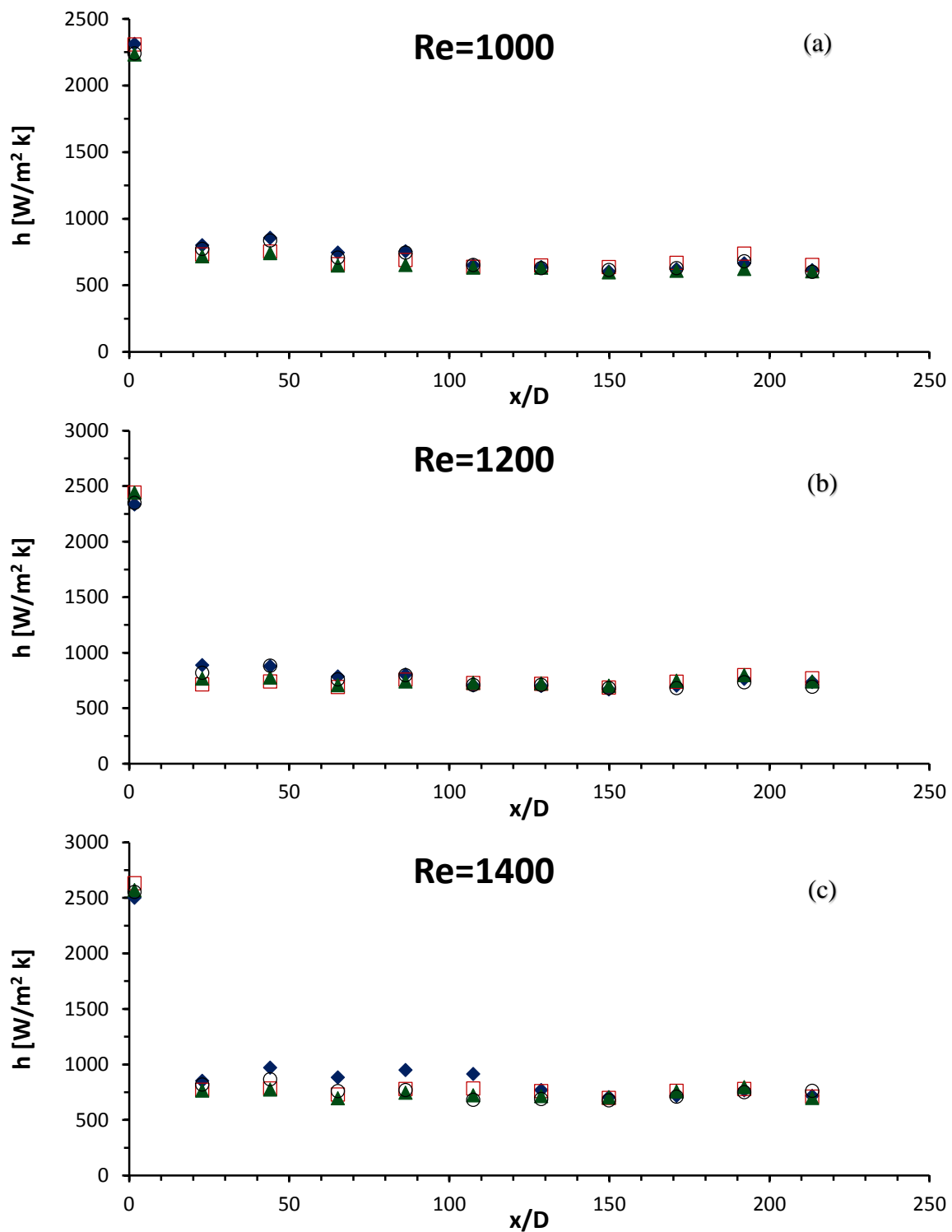


Figura A. 6 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, para $Re=1000$ (a), $Re=1200$ (b) e $Re=1400$ (c).

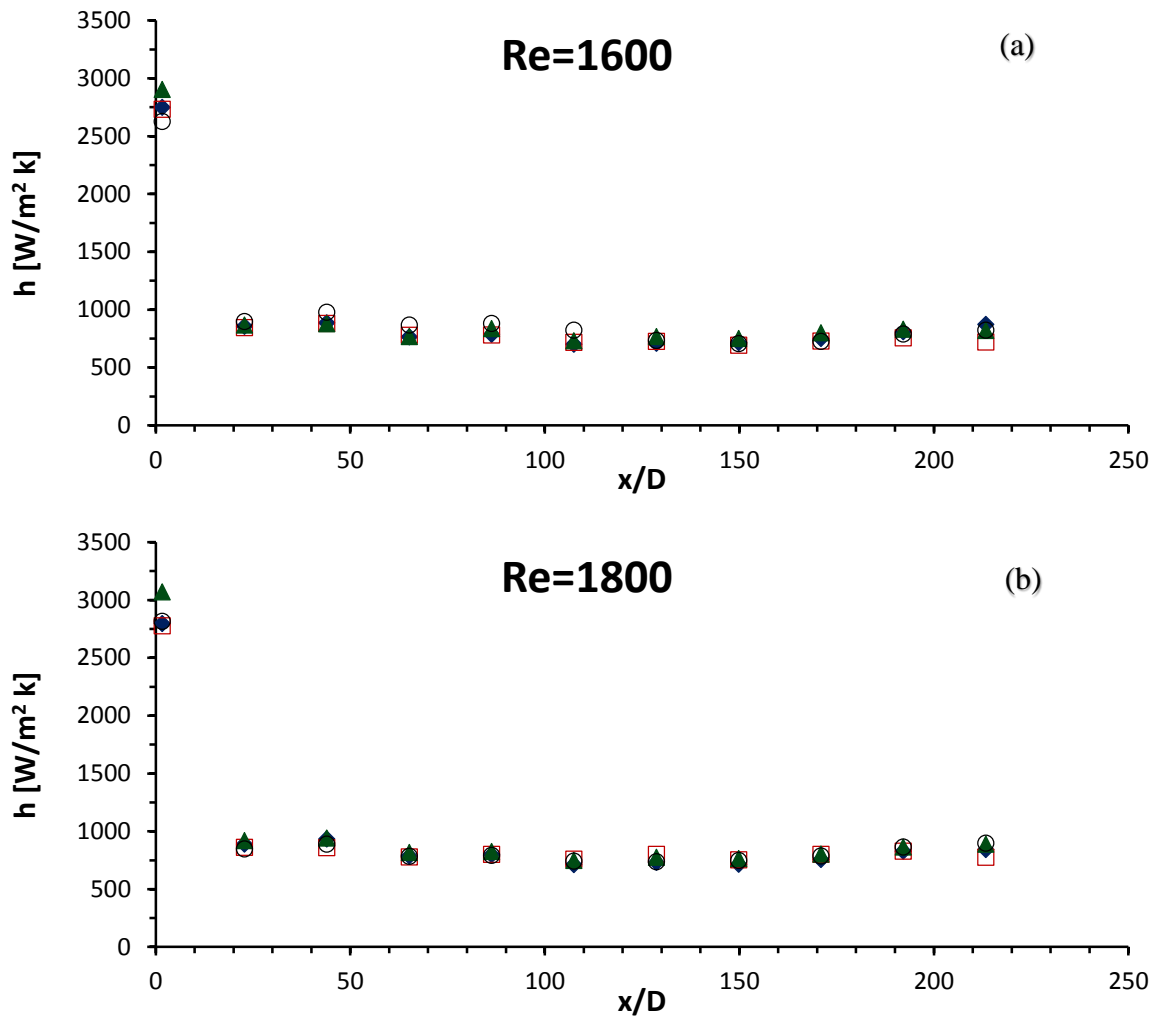


Figura A. 7 - Repetibilidade do coeficiente de transferência de calor em função da posição axial para o fluido de 30EG 70AD, para $Re=1600$ (a) e $Re=1800$ (b).

Correção da inércia térmica de condução

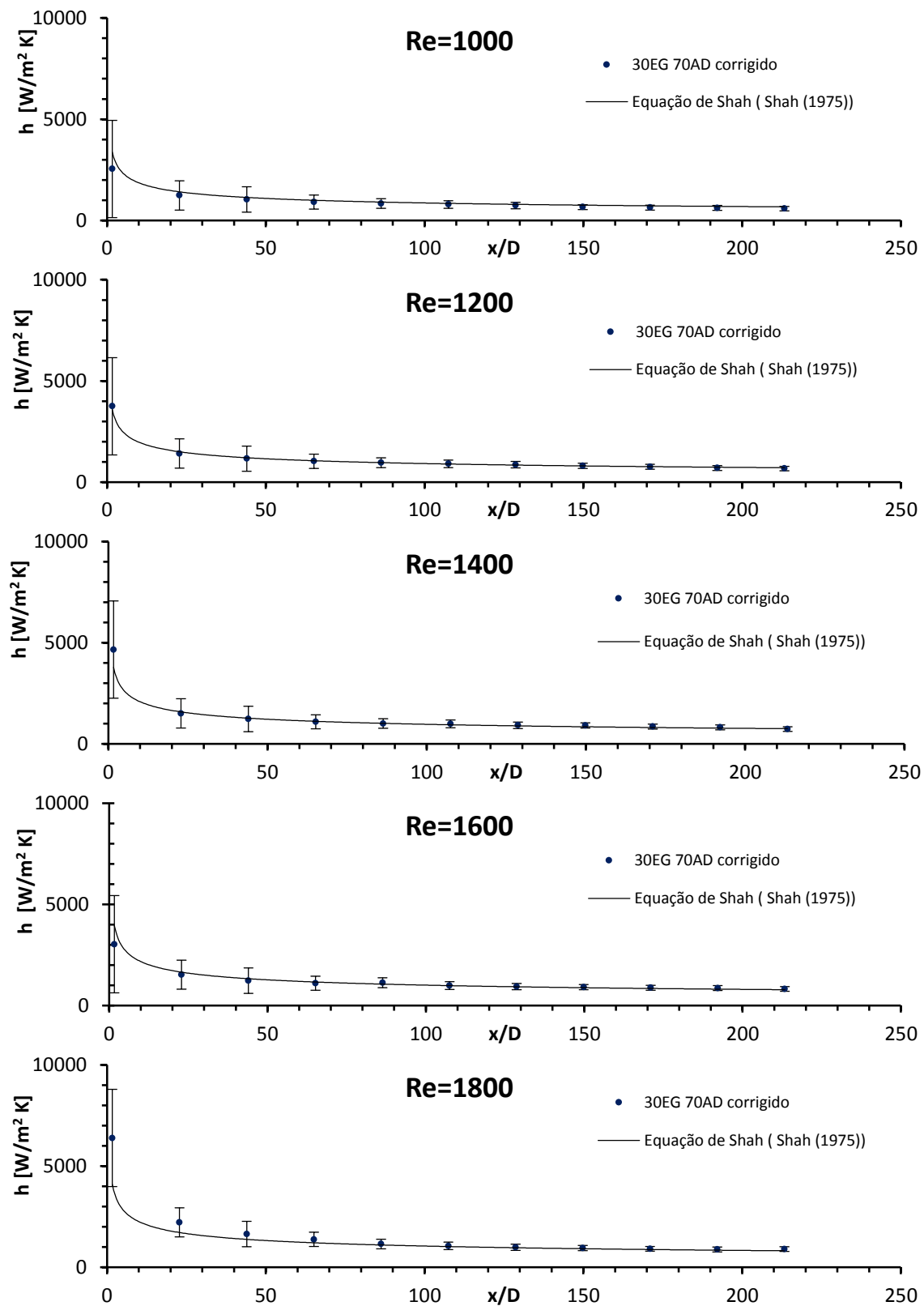


Figura A. 8 - Coeficiente de transferência de calor em função da distância axial, após correção da inércia térmica de condução, para diferentes números de Reynolds.

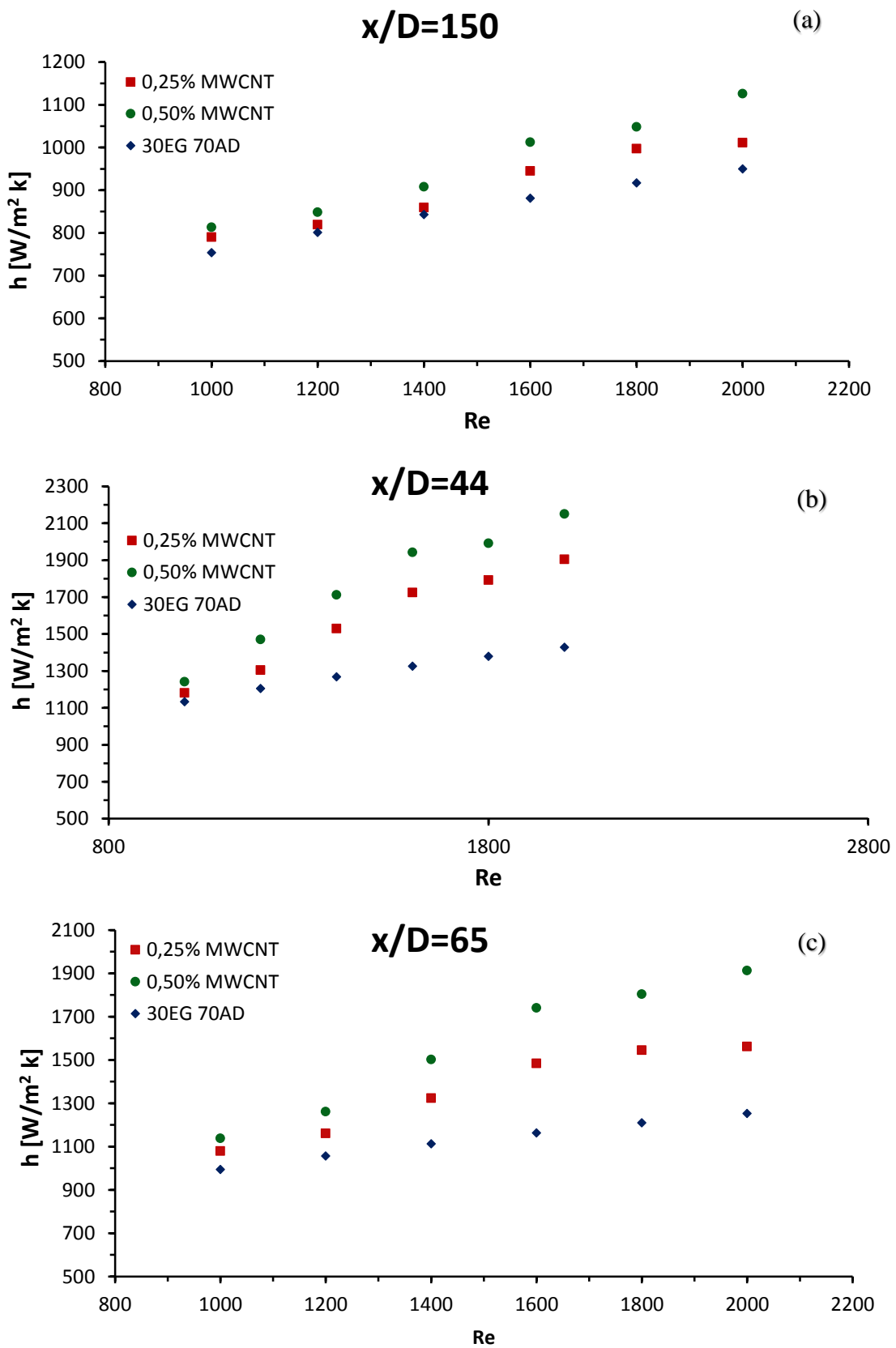


Figura A. 9 - Coeficiente de transferência de calor para os nanofluidos e para o fluido base em função do número de Reynolds, para distância axial de $x/D=150$ (a), $x/D=44$ (b) e $x/D=65$ (c).

Coeficiente de transferência de calor

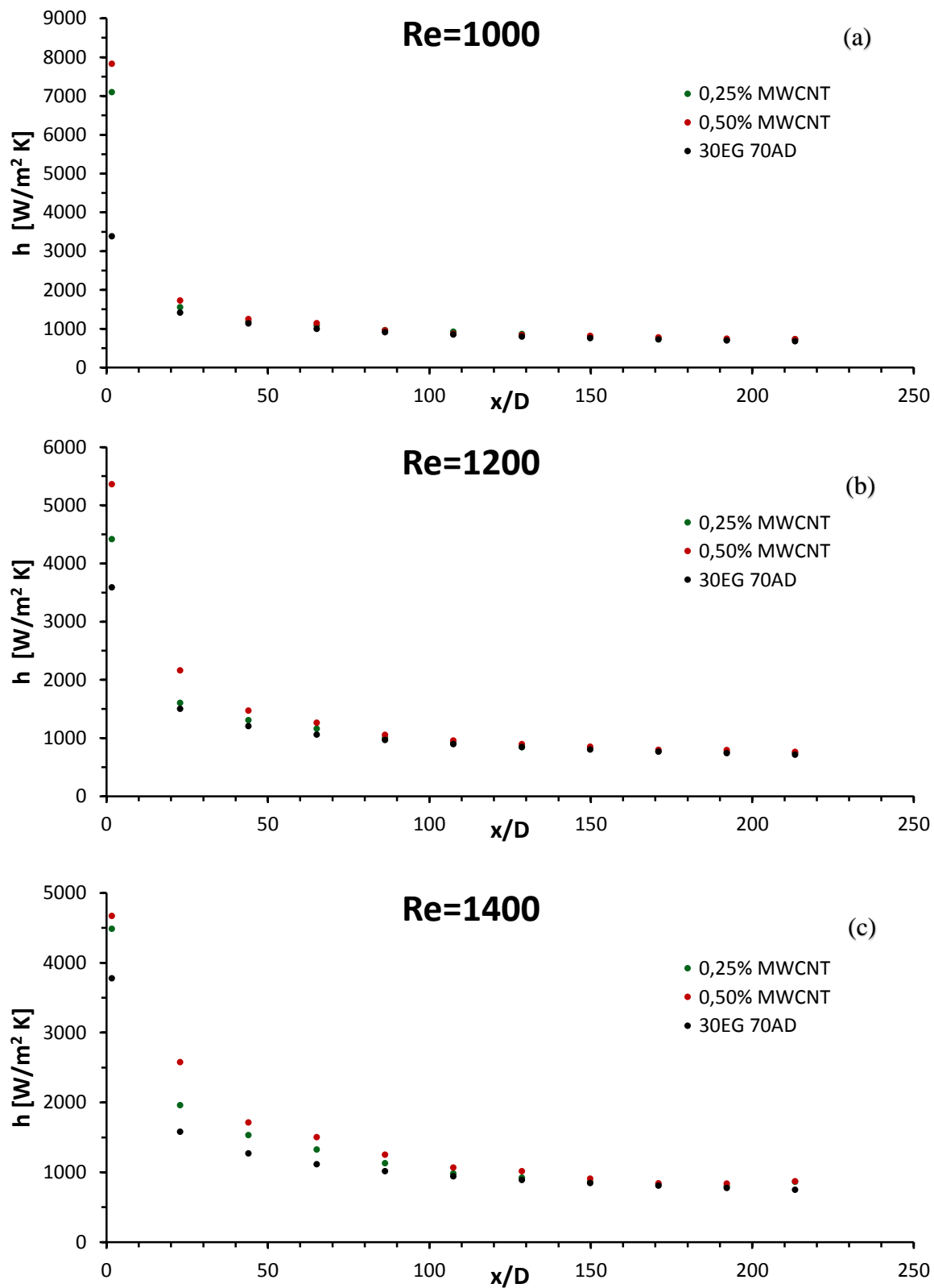


Figura A. 10 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para $Re=1000$ (a), $Re=1200$ (b) e $Re=1400$ (c).

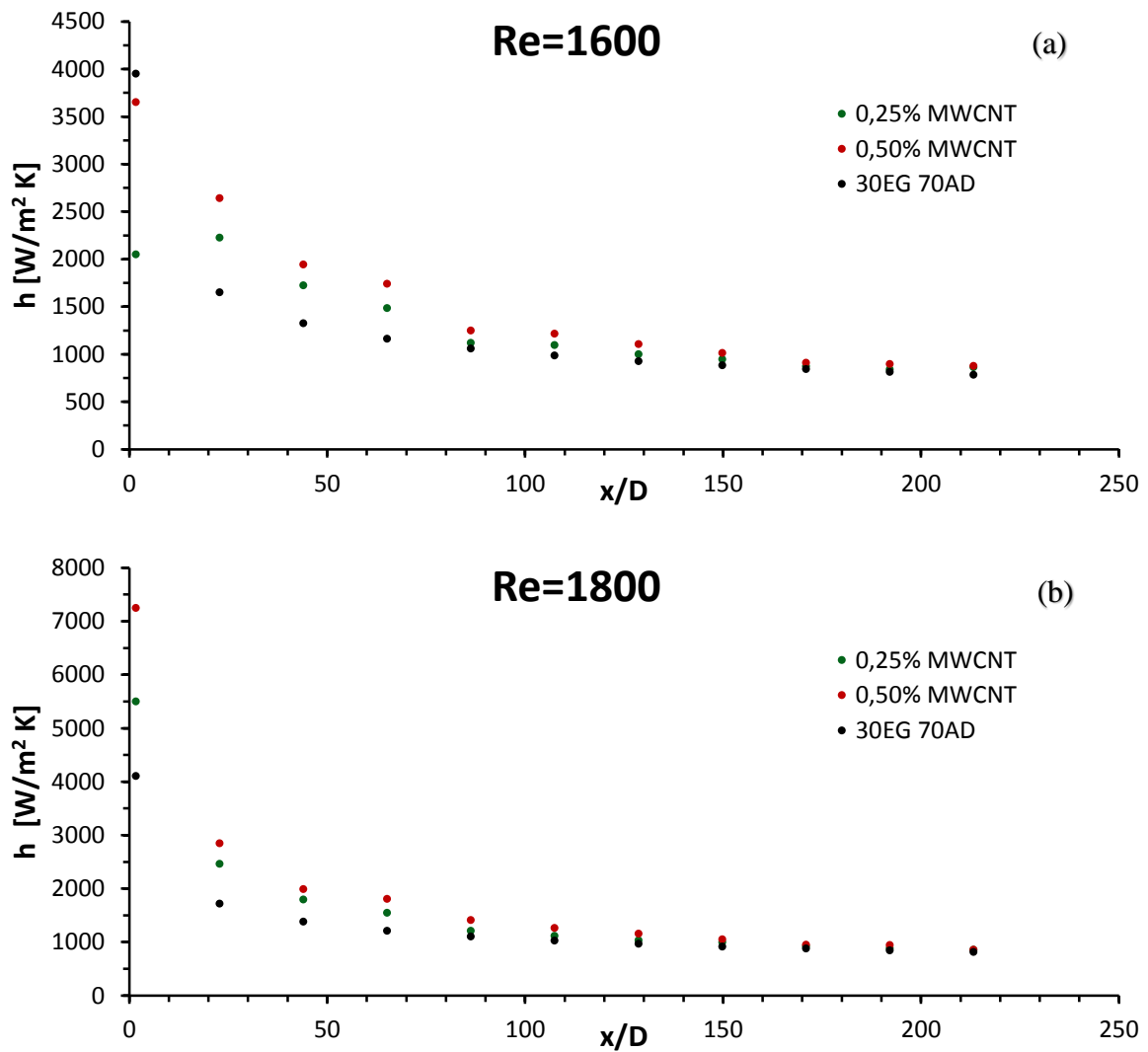


Figura A. 11 - Coeficiente de transferência de calor para os diferentes fluidos em função da distância axial, para Re=1600 (a) e Re=1800 (b).

Número de Nusselt

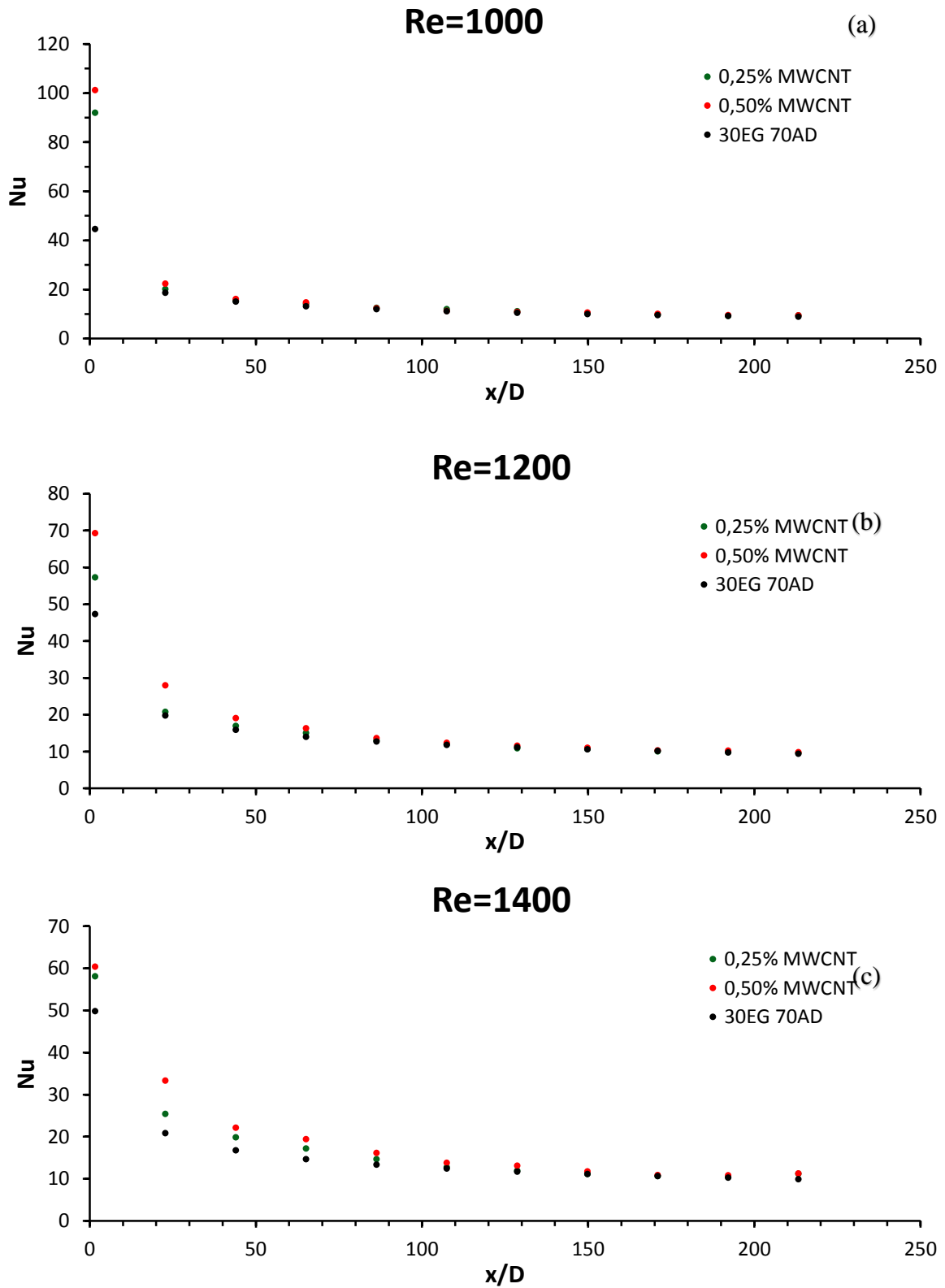


Figura A. 12 – Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para Re=1000 (a), Re=1200 (b) e Re=1400 (c).

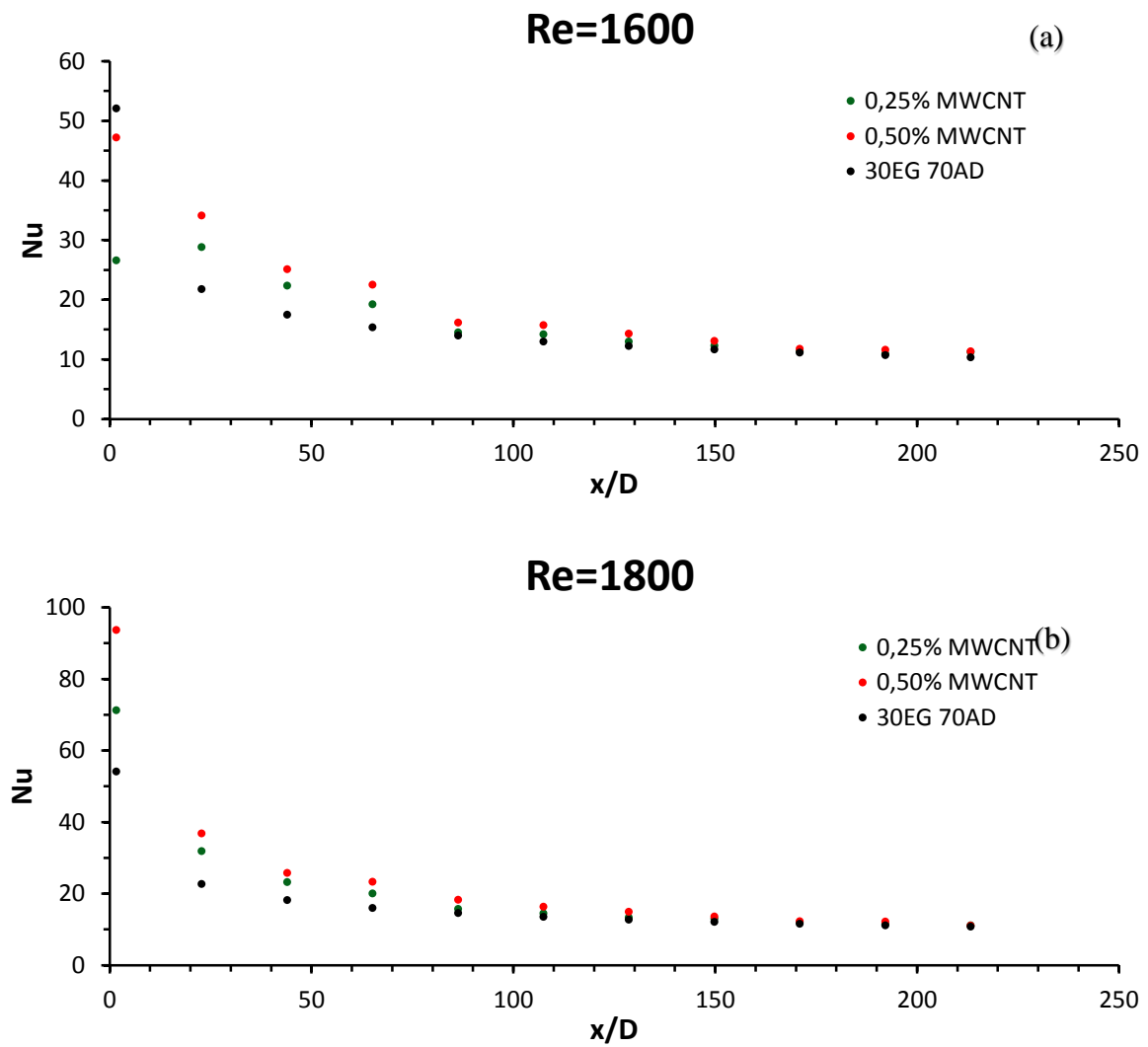


Figura A. 13 - Número de Nusselt para os diferentes fluidos em função da distância axial, para Re=1600 (a) e Re=1800 (b).

Número de Nusselt para nanofluido com 0,25%vol MWCNT

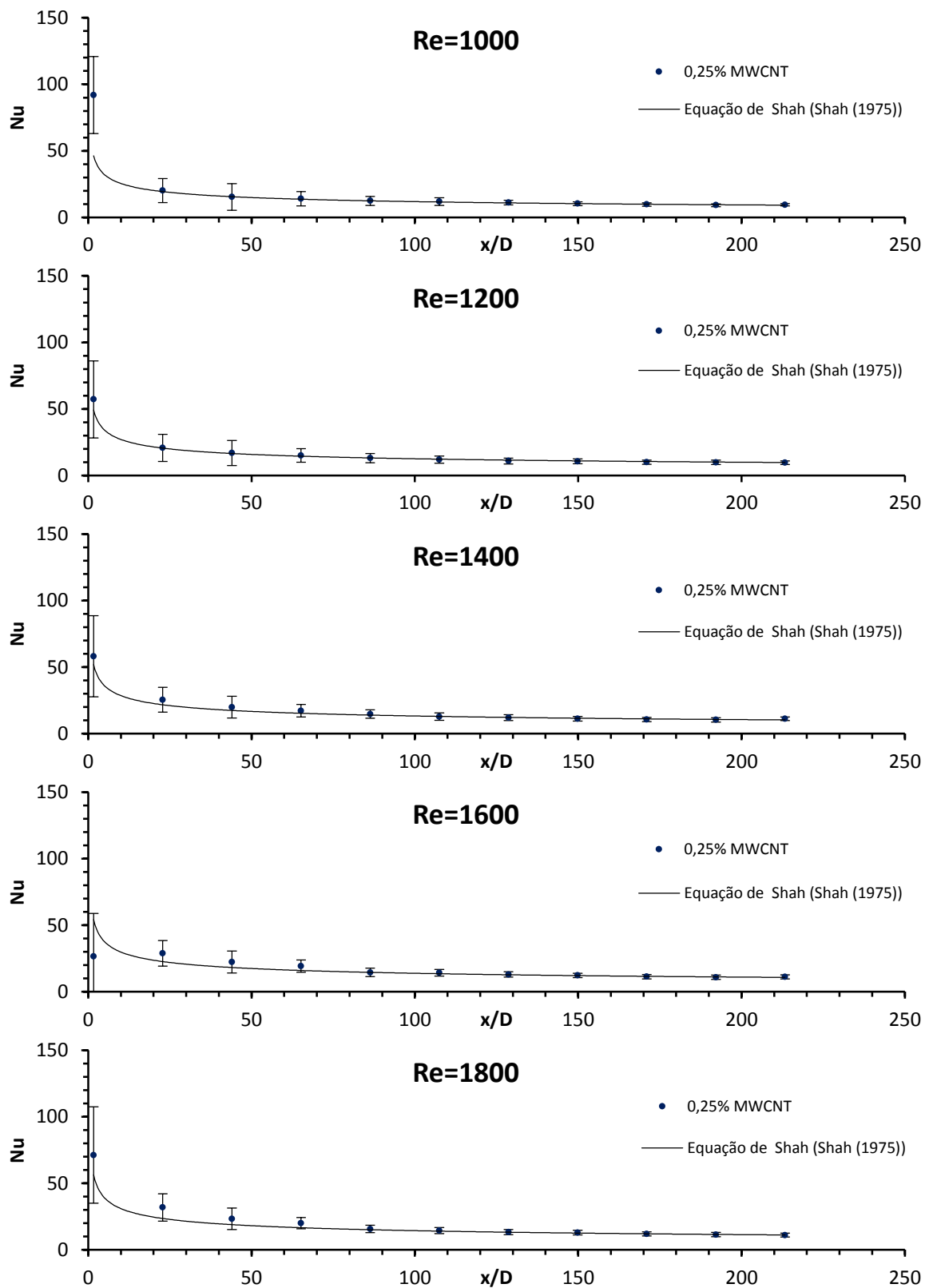


Figura A. 14 - Número de Nusselt para os nanofluidos de 0,25%vol MWCNT em função da distância axial, para diferentes números de Reynolds.

Número de Nusselt para nanofluido com 0,50% vol MWCNT

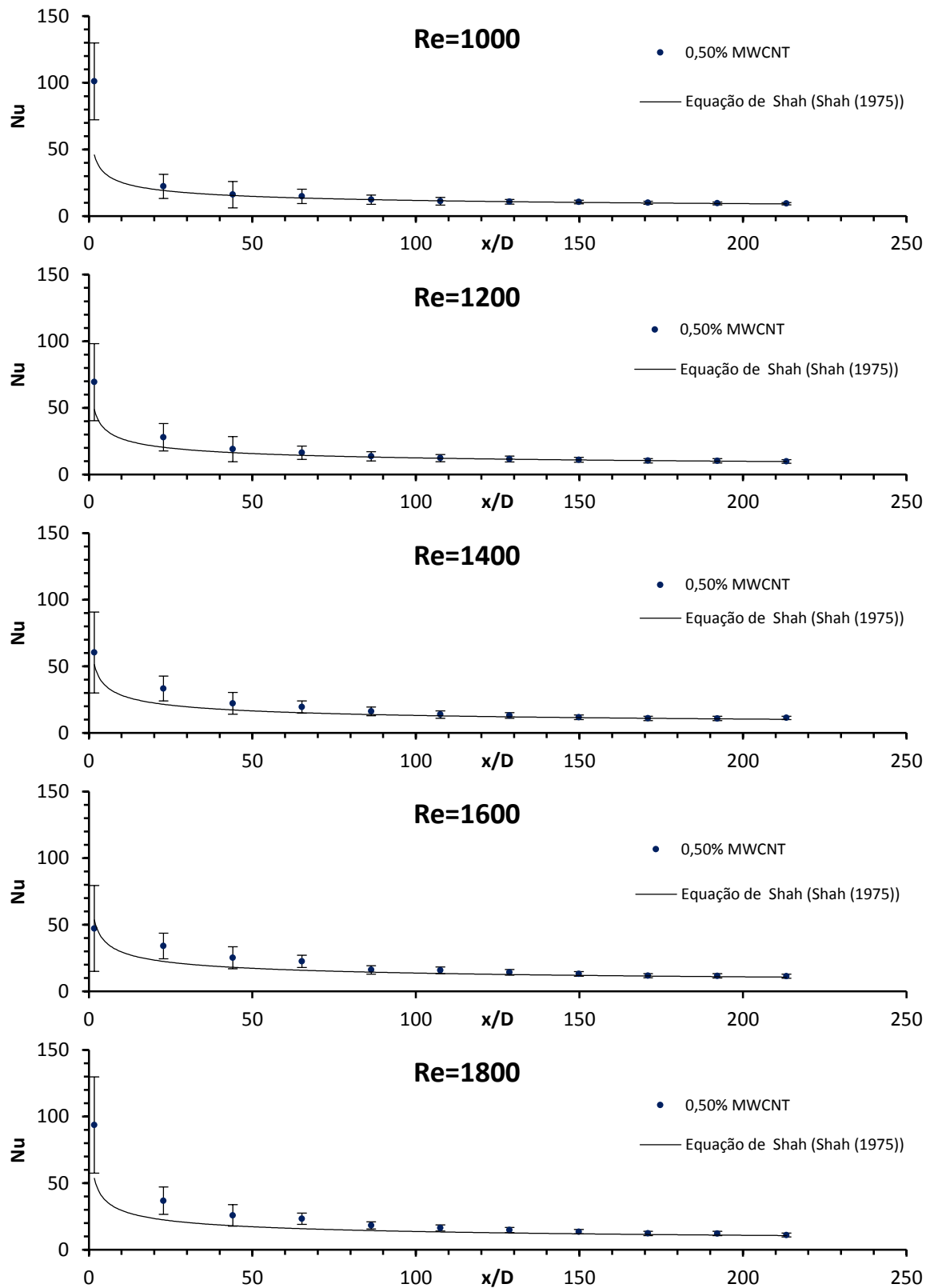


Figura A. 15 - Número de Nusselt para os nanofluidos de e 0,50%vol MWCNT (b) em função da distância axial, para diferentes números de Reynolds.

