



**Luís Pedro
Martins Afonso**

Modelos Reológicos de Nanofluidos



**Luís Pedro
Martins Afonso**

Modelos Reológicos de 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 Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã pelo incansável apoio.

O júri

Presidente

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

Arguente

Doutor Bruno Cardoso Lamas
Engenheiro de Petróleo, Exploração & Produção, Galp Energia S.A.

Orientador

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

agradecimentos

A realização desta tese de mestrado finaliza uma grande e importante etapa da minha vida acadêmica e pessoal, pelo que gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a sua concretização. Em primeiro lugar, quero manifestar os meus agradecimentos à Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, orientadora da presente tese, pelo seu apoio, orientação e grande capacidade motivadora. Quero ainda agradecer ao Eng. Bruno Alexandre Abreu da Silva, uma vez que esta modelação analítica incide essencialmente sobre a base de dados angariada experimentalmente no âmbito do seu programa doutoral de sistemas energéticos e alterações climáticas em curso. Agradece-se ainda toda a ajuda, orientação e apoio prestados por ele no decorrer deste trabalho. Um agradecimento especial a toda a minha família e amigos pelo apoio dado ao longo de todos estes anos da minha vida académica, apoio esse que foi fundamental para a concluir com sucesso, em especial dos meus pais e da minha irmã.

palavras-chave

Nanofluidos, nanotubos de carbono, viscosidade, reologia, modelos reológicos

resumo

A transferência de energia sob a forma de calor é um processo essencial ao funcionamento de uma enorme variedade de equipamentos e indústrias, desde a eletrónica à automóvel. Com o desenvolvimento da nanotecnologia das últimas décadas, várias inovações têm surgido, como é o caso dos nanofluidos. Estas suspensões de nanopartículas em fluidos de permuta, como a água e o etilenoglicol, têm sido consideradas como uma nova classe de fluidos de permuta, com propriedades térmicas superiores relativamente aos fluidos convencionais. A elevada razão de aspeto dos nanotubos de carbono (CNTs) associado ao progresso em técnicas de dispersão, proporcionou o desenvolvimento destas suspensões estáveis e de elevado desempenho térmico.

O principal objetivo desta dissertação prende-se com o estudo do comportamento reológico de nanofluidos à base de CNTs. Desta forma, e utilizando para o efeito medições de viscosidade realizadas por investigadores do GRIDS-DIMOULD do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro), foi assim possível relacionar a viscosidade dos nanofluidos com diferentes variáveis, tais como a temperatura, taxa de corte, concentração e geometria dos CNT e fluidos base. A comparação dos resultados obtidos experimentalmente com previsões postuladas pelos modelos reológicos existentes na literatura são assim objeto de estudo detalhado nesta dissertação. Com este trabalho foi possível estabelecer os limites de validade e aplicabilidade dos modelos existentes, para os nanofluidos em estudo, evidenciando os trabalhos futuros que permitirão desmitificar algumas das dúvidas que ainda persistem na previsão global no comportamento reológico de nanofluidos de nanotubos de carbono.

keywords

Nanofluids, carbon nanotubes, viscosity, rheology, rheological models

abstract

The transfer of energy in the form of heat is an essential process for the operation of a wide variety of equipment and industries ranging from electronics to automotive. With the development of nanotechnology the last decades, various innovations have emerged, such as the nanofluids. These suspensions of nanoparticles in exchange fluids, such as water and ethylene glycol have been considered as a novel class of fluid exchange with superior thermal properties relative to conventional fluids. The high aspect ratio of carbon nanotubes (CNTs) associated with the progress scattering techniques, provided the development of these stable suspensions and high thermal performance.

The main objective of this work relates to the study of the rheological behavior of CNT nanofluids. In this way, and based on viscosity measurements carried out by researchers of GRIDS-DIMOULD at the Mechanical Engineering Department of the University of Aveiro, it was it possible to relate the viscosity of nanofluids with different variables such as temperature, shear rate, concentration and geometry of the CNT and base fluids. The comparison of the results obtained experimentally was established with data predicted by the existing rheological models in the literature. The validity of the latter were therefore detailed studied during this dissertation, and the need for further work was assessed and discussed in order to identify the means to properly derive a generalized rheological model for CNT nanofluids.

Índice

| | |
|--|-----|
| Índice de Figuras | III |
| Índice de Tabelas..... | VI |
| Nomenclatura | IX |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Síntese do capítulo | 1 |
| 1.2. Motivação e Questão-chave do problema | 1 |
| 1.3. Revisão Bibliográfica..... | 6 |
| 1.3.1. Preparação de Nanofluidos | 7 |
| 1.3.2. Estabilidade de Nanofluidos | 8 |
| 1.3.3. Propriedades Termofísicas dos Nanofluidos..... | 11 |
| 1.3.4. Viscosidade..... | 17 |
| 1.3.4.1. Efeito da temperatura na viscosidade | 18 |
| 1.3.4.2. Efeito da forma e tamanho da partícula na viscosidade..... | 19 |
| 1.3.4.3. Efeito da fração volúmica de nanopartículas na viscosidade de um nanofluido | 21 |
| 1.3.4.4. Efeito do fluido base na viscosidade de nanofluidos | 22 |
| 1.3.4.5. Efeito da taxa de corte na viscosidade | 23 |
| 1.3.4.6. Modelos analíticos de viscosidade | 24 |
| 2. Materiais e Métodos | 33 |
| 2.1. Síntese do capítulo | 33 |
| 2.2. Nanofluidos de “MWCNT” | 33 |
| 2.3. Desenho de Experiências..... | 34 |
| 2.4. Funcionalização das nanopartículas | 37 |
| 2.4.1. Qualidade da funcionalização dos MWCNT | 40 |
| 2.4.1.1. Identificação dos grupos funcionais produzidos..... | 40 |
| 2.4.1.2. Avaliação do comportamento térmico | 41 |
| 2.4.1.3. Avaliação da distribuição de tamanhos das nanopartículas | 43 |
| 2.5. Metodologia da dispersão | 45 |
| 2.6. Metodologia da medição de viscosidade | 46 |
| 2.7. Análise global de erros | 48 |
| 3. Resultados e Análise Paramétrica | 51 |
| 3.1. Síntese do capítulo | 51 |
| 3.2. Análise paramétrica..... | 51 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

| | | |
|--------|--|----|
| 3.2.1. | Análise do efeito do fluido base na viscosidade | 51 |
| 3.2.2. | Análise do efeito do tipo de partículas (razão de aspeto) na viscosidade de um nanofluido | 53 |
| 3.2.3. | Análise da influência da concentração de nanopartículas de <i>MWCNT</i> na viscosidade do nanofluido | 58 |
| 3.2.4. | Análise da influência da taxa de corte na viscosidade | 62 |
| 3.3. | Discussão dos resultados..... | 65 |
| 4. | Modelação do comportamento reológico dos Nanofluidos | 67 |
| 4.1. | Síntese do capítulo | 67 |
| 4.2. | Análise comparativa dos modelos teóricos e dos dados experimentais..... | 67 |
| 4.3. | Escolha do modelo teórico mais aproximado aos dados experimentais | 73 |
| 5. | Conclusões e trabalhos futuros | 79 |
| 6. | Referências..... | 81 |
| 7. | Anexos..... | 93 |
| 7.1. | Resumo das medições efetuadas | 93 |
| 7.2. | Análise de Erros | 94 |
| 7.3. | Tabelas de resultados..... | 96 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Condutividade Térmica de sólidos e líquidos comuns, à temperatura ambiente (Incropera, 2006) | 4 |
| Figura 1.2: Comportamento dos vários tipos de fluidos..... | 5 |
| Figura 1.3: Comportamento típico de um fluido tixotrópico (a) e reopético (b) | 6 |
| Figura 1.4: Nanotubos de carbono de parede simples (a) e parede múltipla (b) | 7 |
| Figura 2.1: Imagem SEM de MWCNTs prístinos (a) e funcionalizados (b) (adaptado de Lamas, 2013) | 39 |
| Figura 2.2: Espectro de FTIR comparando MWCNT prístinos e funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013) | 41 |
| Figura 2.3: Gráfico da análise TGA e consequente comparação entre MWCNT prístinos e funcionalizados (d50-80 I10-20) (adaptado de Lamas, 2013)..... | 43 |
| Figura 2.4: Ilustração de uma imagem SEM de uma dispersão de MWCNTs (a) e representação esquemática do procedimento de medida usado (b) (adaptado de Lamas, 2013) | 45 |
| Figura 2.5: Esquema dos diferentes componentes do reómetro Brookfield DV-III Ultra LV Rheometer | 47 |
| Figura 3.1: Gráfico comparativo da viscosidade de dois tipos de fluidos base diferentes..... | 52 |
| Figura 3.2 Gráfico das curvas teóricas de ASHRAE para 4 tipos de fluidos base constituintes de nanofluidos | 53 |
| Figura 3.3: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base (30%EG+AD) mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 0.25%vol | 54 |
| Figura 3.4: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 0.75%vol | 54 |
| Figura 3.5: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 1.5%vol | 55 |
| Figura 3.6: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 1.5%vol | 55 |
| Figura 3.7: Gráfico comparativo da viscosidade entre três nanofluidos com o mesmo fluido base de 60%EG+DW mas com nanopartículas de dimensões diferentes a uma concentração de 0.25%vol..... | 56 |
| Figura 3.8: Gráfico comparativo da viscosidade de dois nanofluidos constituídos pelo mesmo fluido base (30%EG+AD) e pela mesma concentração de nanotubos de carbono (0.25%vol) e com nanotubos de carbono de igual comprimento (L5-15) mas diferentes diâmetros | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas..... | 58 |
| Figura 3.10: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L10-30 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas..... | 58 |
| Figura 3.11: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas..... | 59 |
| Figura 3.12: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L5-15 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas..... | 59 |
| Figura 3.13: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L10-30 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas..... | 60 |
| Figura 3.14: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas..... | 60 |
| Figura 3.15: Gráfico da relação entre a viscosidade relativa com a concentração de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 numa solução aquosa com 30% de etilenoglicol, para diferentes temperaturas. | 61 |
| Figura 3.16: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0.25%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas. | 62 |
| Figura 3.17: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0.75%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas. | 63 |
| Figura 3.18: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 1.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas. | 63 |
| Figura 3.19: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 60% de etilenoglicol a várias temperaturas. | 64 |
| Figura 3.20: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 1.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas. | 64 |
| Figura 4.1: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 0,25%vol..... | 68 |
| Figura 4.2: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 0,75%vol..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.3: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 1,5%vol..... | 70 |
| Figura 4.4: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 0,25%vol..... | 71 |
| Figura 4.5: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 0,75%vol..... | 72 |
| Figura 4.6: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 1,5%vol..... | 72 |
| Figura 4.7: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 0,25%vol de partículas de D60-100 e L1-2. | 74 |
| Figura 4.8: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 0,75%vol de partículas de D60-100 e L1-2. | 75 |
| Figura 4.9: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 1,5%vol de partículas de D60-100 e L1-2. | 75 |
| Figura 4.10: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 0,25%vol de partículas de D20-40 e L10-30. | 76 |
| Figura 4.11: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 0,75%vol de partículas de D20-40 e L10-30. | 76 |
| Figura 4.12: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 1,5%vol de partículas de D20-40 e L10-30. | 77 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1: Propriedades Termofísicas da água, etilenoglicol e polialfaolefina à temperatura ambiente (Incropera, 2006) | 3 |
| Tabela 1.2: Sumário dos principais estudos sobre condutividade térmica | 16 |
| Tabela 1.3: Constantes associadas ao modelo de Syam Sundar et al.(2014) | 28 |
| Tabela 2.1: Relação esperada dos fatores de controlo com os mecanismos que governam as propriedades termofísicas de um fluido (i.e. condutividade térmica) (adaptado de (Lamas, 2013)). | 34 |
| Tabela 2.2: Designação dos vários tipos de nanopartículas e suas principais características (adaptado de (Lamas, 2013))..... | 35 |
| Tabela 2.3: Fatores de controlo e suas variações na investigação efetuada. | 37 |
| Tabela 2.4: Substâncias e suas quantidades na preparação das amostras medidas. | 38 |
| Tabela 2.5: Perda de massa medida por TGA a 323,15K e 1023,15K, para MWCNT funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013) | 43 |
| Tabela 7.1: Resumo de todas as medições efetuadas | 93 |
| Tabela 7.2: Distribuição de T-Student | 94 |
| Tabela 7.3: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 96 |
| Tabela 7.4: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 96 |
| Tabela 7.5: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 97 |
| Tabela 7.6: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 97 |
| Tabela 7.7: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 97 |
| Tabela 7.8: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 98 |
| Tabela 7.9: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 98 |
| Tabela 7.10: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 98 |
| Tabela 7.11: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 7.12: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 99 |
| Tabela 7.13: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 99 |
| Tabela 7.14: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 100 |
| Tabela 7.15: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 100 |
| Tabela 7.16: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 100 |
| Tabela 7.17: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG. | 101 |
| Tabela 7.18: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 101 |
| Tabela 7.19: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 101 |
| Tabela 7.20: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 102 |
| Tabela 7.21: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 102 |
| Tabela 7.22: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 102 |
| Tabela 7.23: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 103 |
| Tabela 7.24: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 103 |
| Tabela 7.25: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 103 |
| Tabela 7.26: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 104 |
| Tabela 7.27: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 104 |
| Tabela 7.28: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 104 |
| Tabela 7.29: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG. | 105 |

Tabela 7.30: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.105

Tabela 7.31: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.105

Tabela 7.32: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.106

Nomenclatura

| | |
|-----------|--|
| μ | Viscosidade |
| γ | Tensão de corte |
| ρ | Densidade |
| φ | Fração Volúmica |
| β | Fricção dinâmica |
| η | Viscosidade Intrínseca |
| k | Condutividade térmica |
| h | Coefficiente de transferência de calor por convecção |
| Nu | Número de Nusselt |
| T | Temperatura |
| t | Tempo |
| c_p | Calor específico |
| D | Diâmetro do tubo |
| L | Comprimento do tubo |
| EG | Etilenoglicol |
| AD | Água destilada |
| CNT | Nanotubo de carbono |
| $SWCNT$ | Nanotubo de carbono de parede simples |
| $MWCNT$ | Nanotubo de carbono de parede múltipla |
| nf | Nanofluido |
| fb | Fluido base |

1. Introdução

1.1. Síntese do capítulo

Os nanofluidos são suspensões de partículas à escala nanométrica dispersas num fluido base convencional. As nanopartículas constituintes desta mistura coloidal têm dimensões compreendidas entre 1 e 100 nm. Se as nanopartículas constituintes dos nanofluidos possuírem dimensões e fração de volume adequadas, os nanofluidos apresentam uma melhoria significativa do coeficiente de transferência de calor quando comparados com os fluidos convencionais.

O objetivo deste trabalho de dissertação é analisar a viscosidade de um nanofluido de base de etilenoglicol e água com diferentes concentrações de nanotubos de carbono (*CNTs*), evidenciando a sua relação com a temperatura, de modo a modelar o seu comportamento reológico.

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, caracterizando o fluido, entre outros, na variação da viscosidade com a temperatura. Dentro dos comportamentos reológicos, há fluidos em que a tensão tangencial e o seu gradiente de velocidade têm uma relação linear e por isso considera-se que esses fluidos têm um comportamento típico de um fluido newtoniano. Por outro lado, são considerados fluidos não-newtonianos aqueles em que essa relação não é linear. No caso desta dissertação, urge saber em qual das categorias se pode incluir o nanofluido em estudo. Para isso, o conhecimento experimental adquirido sobre o tema permitirá formar uma base de dados que irá contribuir para a sua divulgação em diversas aplicações de engenharia. O objetivo deste capítulo é o de introduzir o trabalho de investigação, reportando investigações anteriores, que irão contribuir para o aprofundar do conhecimento no âmbito do trabalho a desenvolver nesta dissertação.

1.2. Motivação e Questão-chave do problema

A desmaterialização da economia é um dos caminhos para a promoção do desenvolvimento sustentável na medida em que elimina ou reduz a utilização de recursos naturais, fazendo mais com menos. A intensificação dos processos tecnológicos é uma forma de desmaterializar a economia. Sistemas mais compactos e mais eficientes consomem menos recursos. No caso concreto dos sistemas envolvendo processos de troca de calor, a intensificação resulta na redução da área de permuta e da quantidade de fluido de trabalho, o que para além de outra vantagem que possa apresentar decorrentes da miniaturização, é um contributo inegável para a sustentabilidade da sociedade através do desenvolvimento científico e tecnológico.

Relembrando a lei de Newton da convecção, a transferência de calor depende do coeficiente de convecção (h), da área onde se dá a transferência de calor e da diferença de temperatura entre os dois meios onde essa transferência se pode dar. A lei de Newton é então expressa pela equação:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T, \quad (1.1)$$

com

$$h = Nu \cdot \frac{k}{L}, \quad (1.2)$$

onde Q é o fluxo de calor, Nu é o número de Nusselt, k é a condutividade térmica do sistema e L é a dimensão característica do sistema (Incropera, 2006).

O fluxo de transferência de calor pode ser aumentado variando os parâmetros da equação anterior. O aumento da diferença de temperatura pode ser limitado pelos constrangimentos do processo ou materiais, por isso, uma estratégia que é mais usada consiste em maximizar a área de superfície onde são possíveis as trocas de calor. Contudo, nos últimos anos tem-se verificado uma sucessiva miniaturização de todos os equipamentos, pelo que esta maximização da área, provocando o aumento do volume do permutador de calor, pode não ser possível devido às dimensões reduzidas dos equipamentos. Esta questão tem vindo a ser desenvolvida pelo desenvolvimento de novas tecnologias, como microcanais de transferência de calor com uma relação área de superfície-volume melhorada (Khan e Fartaj, 2011; Mohammed *et al.*, 2011; Siddique e Khaled, 2010).

Outro modo de aumentar a transferência de calor é então aumentar o coeficiente de transferência de calor. Este aumento é proporcionado principalmente pelo aumento significativo da velocidade do escoamento, que faz aumentar o número de Nusselt, pelo que irá produzir um aumento da potência de bombagem. Contudo, as fracas propriedades térmicas dos fluidos base convencionais são impeditivo para inovação na geometria e miniaturização de permutadores de calor.

Uma estratégia adicional consiste no aumento das propriedades térmicas dos fluidos convencionais, de modo a melhorar o coeficiente de convecção, nomeadamente através da junção de partículas ao fluido convencional. Como é do conhecimento geral, os sólidos têm uma maior condutividade térmica que os fluidos, pelo que uma mistura de partículas sólidas num fluido convencional irá aumentar a condutividade da mistura, tal como provado em experiências e teorias, nomeadamente por Maxwell, que em 1873 provou que o acréscimo de partículas de dimensões da escala do milímetro e micrómetro a um fluido convencional melhoravam as

propriedades de transferência de calor, numa teoria designada por *Effective Medium Theory* (EMT). Este modelo tem como limitações o facto de as partículas serem demasiado grandes, pelo que podem ocorrer fenómenos de deposição e conseqüente sedimentação das partículas no fluido, desgaste das tubagens, obstrução de canais e perdas de carga acentuadas (Hamilton e Crosser, 1962; Maxwell, 1881).

Como solução, em 1995, Choi desvendou uma nova classe de fluidos de transferência, que seriam constituídos por nanopartículas em fluidos base convencionais, pelo que os denominou de nanofluidos. Relativamente aos fluidos de Maxwell, estes nanofluidos apresentam áreas de contacto mais elevadas, pelo que permitem uma maior transferência de calor, sem os problemas existentes dos fluidos com partículas maiores. As nanopartículas têm propriedades físicas diferentes das correspondentes de um sólido maciço. Além disso, a composição química, tamanho, forma e a própria superfície têm também um papel importante nas características físicas das nanopartículas, pois à nanoescala, a percentagem de átomos na superfície torna-se significativo, tendo por isso uma maior razão superfície-volume que as micropartículas e os sólidos maciços (Duncan e Rouvray, 1989; Xuan e Li, 2000). Apresentam também melhores propriedades térmicas que os fluidos base convencionais, como é possível observar na tabela 1.1, assim como mecânicas, óticas, magnéticas e elétricas. Possibilitam ainda o ligeiro aumento da viscosidade, que se pode traduzir em baixas perdas de carga (Duncan e Rouvray, 1989; Xuan e Li, 2000).

Tabela 1.1: Propriedades Termofísicas da água, etilenoglicol e polialfaolefina à temperatura ambiente (Incropera, 2006)

| Propriedade Termofísica | Água | Etilenoglicol | Polialfaolefina |
|--------------------------------|-------|---------------|-----------------|
| Condutividade Térmica [W/m.K] | 0,613 | 0,252 | 0,145 |
| Viscosidade Dinâmica [Pa.S] | 0,001 | 0,016 | 0,999 |
| Densidade [G/Cm ³] | 0,997 | 1,114 | 0,890 |
| Calor Específico [kJ/kg.K] | 4,178 | 2,415 | 1,868 |

Em suma, como principais vantagens do uso de nanofluidos ao invés de fluidos convencionais e fluidos com micropartículas (Ding *et al.*, 2006):

- Aumento da condutividade térmica;
- Melhores condições de estabilidade;
- Menores quedas de pressão;
- Menor probabilidade de desgaste de superfícies de permuta de calor;
- Possibilidade de ser introduzido nas atuais tecnologias de sistemas térmicos.

As nanopartículas constituintes dos nanofluidos podem ser de 2 tipos, metálicas, onde se incluem o cobre, o ferro e o alumínio, e não-metálicas, onde são incluídas a sílica, óxido de cobre e os

nanotubos de carbono (*CNTs*). Os fluidos base convencionais incluem a água, o etilenoglicol e o óleo.

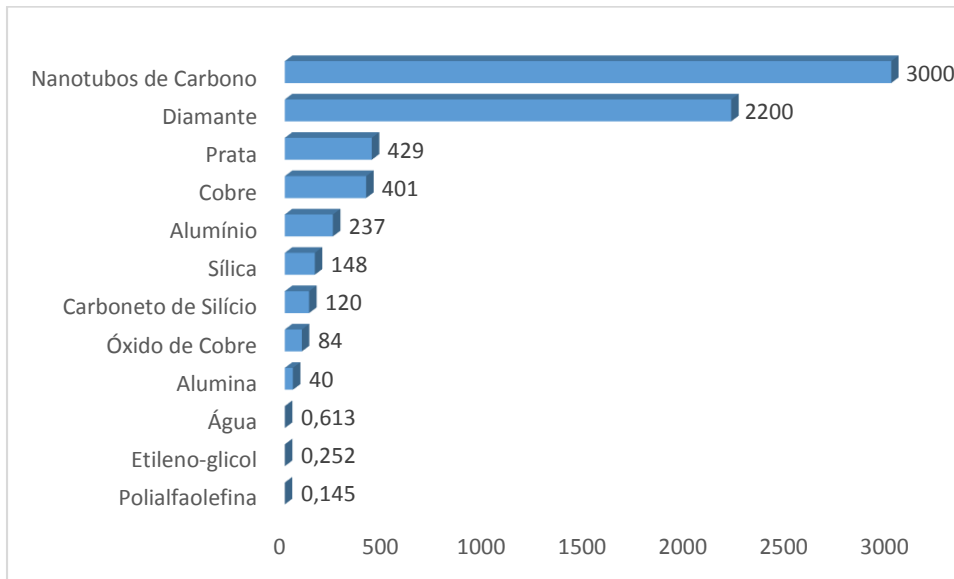


Figura 1.1: Condutividade Térmica de sólidos e líquidos comuns, à temperatura ambiente (Incropera, 2006)

Por tudo isto, a literatura é unânime na identificação do potencial dos nanofluidos como fluidos de permuta, dada a sua elevada condutividade, no entanto a falta de rigor subjacente às técnicas de preparação dos mesmos, assim como de um conhecimento sistemático das suas propriedades físicas suportado por modelos físico-matemáticos devidamente validados levam a que a operacionalização industrial esteja longe de ser concretizável.

Um dos comportamentos dos nanofluidos que urge modelar é o seu comportamento reológico, e por isso o objetivo deste trabalho é caracterizar os modelos reológicos do nanofluidos cujas nanopartículas são os nanotubos de carbono (*CNT*) num fluido base que é uma mistura de etilenoglicol e água. Estes nanotubos de carbono são dos materiais com maior condutividade térmica, como é possível constatar pela análise da figura 1.1, o que permite ao nanofluido que os contém ter um melhor comportamento térmico relativamente às trocas de calor.

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, caracterizando o fluido, entre outros aspetos, na variação da viscosidade com a temperatura. A viscosidade de um fluido descreve a resistência interna do escoamento desse fluido, medindo indiretamente a sua taxa de tensão-deformação, sendo esta uma importante propriedade termofísica para todas as aplicações térmicas envolvendo fluidos. É uma propriedade térmica que influencia o transporte de matéria. Dentro dos comportamentos reológicos, existem fluidos em que a tensão tangencial e o seu gradiente de velocidade têm uma relação linear e por isso considera-se que esses fluidos

têm um comportamento típico de um fluido newtoniano. Isto significa na prática que a uma dada temperatura, a viscosidade se mantém constante, qualquer que seja o método de medição e a velocidade usada na medição. Por outro lado, são considerados fluidos não-newtonianos aqueles em que essa relação não é linear. Ou seja, quando a taxa de corte é variada, a tensão de corte não varia na mesma proporção. Na figura 1.2, é possível observar as diferenças comportamentais entre um fluido Newtoniano e um fluido não-Newtoniano.

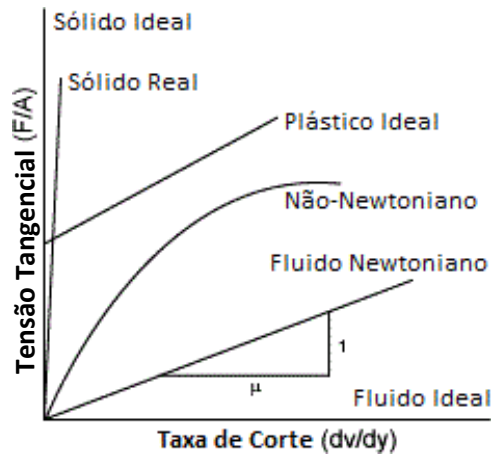


Figura 1.2: Comportamento dos vários tipos de fluidos

Dentro dos fluidos não-Newtonianos, existem 3 tipos de classificações de fluidos: pseudoplásticos, dilatantes e plásticos. Nos primeiros, os mais comuns, a viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte, pelo que se incluem neste tipo as emulsões e tintas. Nos fluidos do tipo dilatantes a viscosidade tem uma dependência exponencial com a taxa de corte, e é observada em lamas de argila, amido de milho em água, entre outros. Por último, os fluidos plásticos comportam-se como um sólido sob condições estáticas, tendo como principal diferença dos pseudoplásticos o facto da diminuição da viscosidade com a taxa de corte ser mais acentuada.

Ainda dentro dos fluidos não-newtonianos, existem mais duas classes de fluidos, cuja principal propriedade é o facto de ter como variável dependente o tempo. São estes fluidos denominados de reopéticos e tixotrópicos. Um fluido tixotrópico é aquele em que quanto maior for o intervalo de tempo em que este está sujeito a tensões de corte, menor será a sua viscosidade. Isto é, demora um tempo finito que a sua viscosidade diminua até que esta alcança um valor de equilíbrio (constante) quando ocorre uma mudança da tensão de corte. Este efeito na viscosidade do fluido pode ou não ser reversível, existindo fluidos que nunca recuperam o valor inicial de viscosidade. Na figura 1.3.a) é possível observar-se o comportamento típico de um fluido tixotrópico.

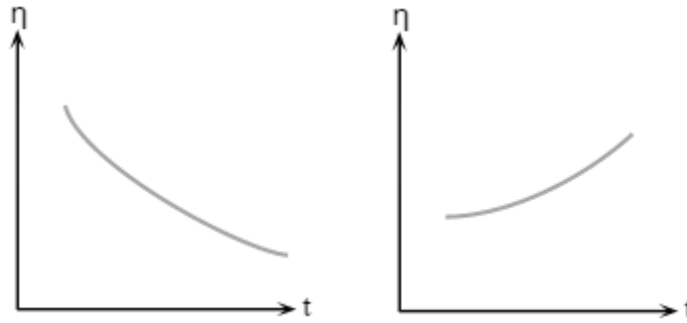


Figura 1.3: Comportamento típico de um fluido tixotrópico (a) e reopético (b)

O segundo tipo de fluidos não-Newtonianos cuja viscosidade depende do tempo são os fluidos reopéticos. Ao contrário dos fluidos tixotrópicos, a principal característica do comportamento destes fluidos é a viscosidade a aumentar com o passar do tempo, até atingir o equilíbrio, como se pode observar na figura 1.3.b). Neste fluido é possível ocorrer o fenómeno de irreversibilidade, tal como acontece com os tixotrópicos (Barnes, 1997).

1.3. Revisão Bibliográfica

Como foi referido, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar nanofluidos com nanopartículas de carbono que irão ser utilizados em sistemas de engenharia.

Os nanotubos de carbono (*CNT*) são alótropos de carbono com uma estrutura cilíndrica à escala nanométrica e com um comprimento muito maior que o seu diâmetro (Iijima, 1991). Estas moléculas de carbono possuem propriedades térmicas, mecânicas e elétricas que o tornam um composto único nas suas aplicações. Este composto pode ser classificado em duas categorias, consoante a sua estrutura: nanotubos de parede única (*single-walled carbon nanotubes – SWCNT*) (figura 1.4.a) e nanotubos de paredes múltiplas (*multi-walled carbon nanotubes – MWCNT*) (figura 1.4.b). Após a sua descoberta, em 1991, têm-se multiplicado as pesquisas e investigações sobre estas nanopartículas (Meyyappan, 2004).

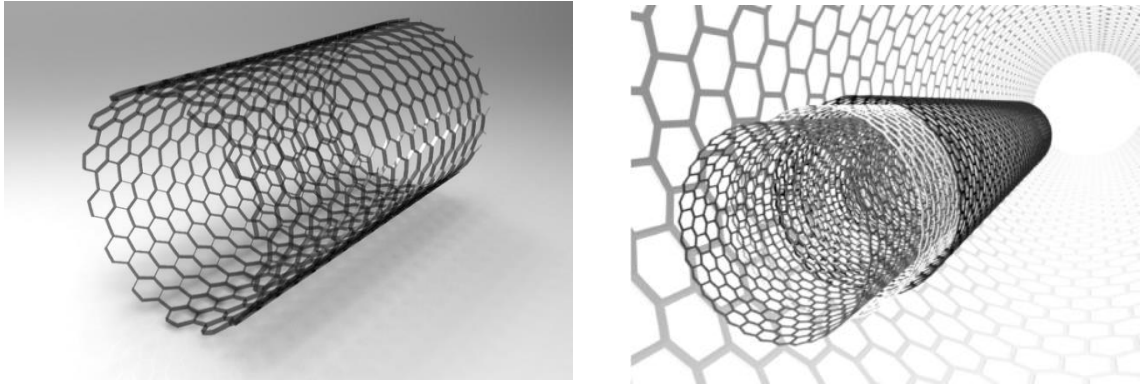


Figura 1.4: Nanotubos de carbono de parede simples (a) e parede múltipla (b)

Existem variadas técnicas para a sintetização destas nanopartículas, sendo a *CCVD* (*catalytic chemical vapour deposition*) uma das mais conhecidas e usadas, uma vez que é possível sintetizar *CNTs* com comprimentos e diâmetros controlados, respetivamente, através da manipulação do tempo da reação química, e pela entidade molecular usada no processo de sintetização. Este método permite a produção de grandes quantidades de *CNT* puro (José-Yacamán *et al.*, 1993). Outras técnicas que são usadas incluem descarga elétrica (*arc-discharge*), remoção por laser, pirólise e deposição de vapor de plasma reforçado, com a primeira a ser usada principalmente nos *CNTs* com diâmetros pequenos, assim como nos *SWCNTs*, apesar de ser uma técnica cara devido às pequenas quantidades produzidas (Hernadi *et al.*, 1996; Keidar e Waas, 2004; Merchan-Merchan *et al.*, 2010; Schnitzler e Zarbin, 2008).

1.3.1. Preparação de Nanofluidos

A preparação de nanofluidos é um dos primeiros passos de grande relevância para o sucesso da produção dos mesmos, uma vez que é necessário garantir a suspensão das partículas para a mistura ter melhor qualidade como fluido de transferência de calor. A síntese deste tipo de fluidos tem de ter certas características essenciais ao seu funcionamento, pois é necessário obter suspensões uniformes, estáveis, duráveis e com baixa aglomeração de partículas. Para isso, podem ser usados dois métodos, o do passo único (*single-step method*) e o método dos dois passos (*two-step method*).

➤ Método do passo único (*One-step method*)

No método do passo único, as partículas são produzidas diretamente dentro do fluido base, ou seja, são simultaneamente produzidas e dispersas no fluido, sendo por isso evitado o processo de secagem, armazenamento e transporte, minimizando assim a aglomeração de nanopartículas (Li *et al.*, 2009).

A maior vantagem deste método de preparação de nanofluidos é o facto de minimizar o fenómeno de aglomeração das partículas, essencial para assegurar a estabilidade do nanofluido, enquanto as suas principais limitações se prendem com o custo relativamente elevado para uma produção em massa, e o facto do controlo do tamanho das partículas ainda estar em desenvolvimento. Além disso, muitas vezes são deixados reagentes no nanofluido devido a reações químicas incompletas, o que limita o potencial de utilidade e aplicabilidade do fluido (Lee *et al.*, 2011).

➤ **Método dos dois passos (*Two-step method*)**

Este método é o mais utilizado na preparação de nanofluidos, incluindo duas etapas, tal como o nome indica. No primeiro passo, são produzidas/sintetizadas as nanopartículas isoladas que numa fase posterior são dispersas no fluido base convencional a partir de técnicas físicas e químicas (Das *et al.*, 2007). Normalmente, o primeiro passo deste método é designado por estabilização de nanopartículas, e o segundo por dispersão de nanopartículas. No primeiro, para a estabilização das nanopartículas podem ser utilizadas técnicas específicas, que serão descritas numa fase posterior deste trabalho. No segundo passo, para a dispersão de partículas são normalmente utilizados equipamentos de ultrassons ou agitadores magnéticos de forma a reduzir a aglomeração de partículas. Um exemplo da utilização deste método é a preparação de nanofluidos com nanotubos de carbono (CNTs) (Lamas *et al.*, 2011).

Comparando os dois métodos, é possível constatar que o método dos dois passos é o mais utilizado por investigadores no campo dos nanofluidos (Nasiri *et al.*, 2011). Este método é ainda o mais económico para ser usado a um nível industrial, mas tem como desvantagem o facto de serem adicionados dispersantes ou estabilizadores para melhorar a estabilidade do nanofluido, mas que podem afetar a condutividade térmica do nanofluido preparado.

1.3.2. Estabilidade de Nanofluidos

Os nanofluidos são mais do que uma simples mistura de nanopartículas num fluido, pois é necessário garantir estabilidade das suspensões de nanopartículas, o que constitui um desafio, devido à tendência de agregação das partículas com o passar do tempo. A alta razão superfície-volume das nanopartículas induzem interações fortes de van der Waals entre as partículas, que associadas ao movimento Browniano (movimento aleatório das partículas suspensas num fluido, devido à sua colisão com átomos ou moléculas no gás ou líquido) podem provocar a agregação das nanopartículas (Nasiri *et al.*, 2011; Vaisman, Wagner e Marom, 2006). Esta agregação faz com

que se comecem a comportar como as micropartículas e comecem a ter características semelhantes a estas. Deste facto resultará a acumulação e posterior obstrução dos canais, diminuindo a condutividade térmica do nanofluido. Por isso, a investigação da estabilidade dos nanofluidos é um fator muito importante para avaliar as suas propriedades termofísicas, de modo a obterem-se nanofluidos estáveis para aplicações em sistemas de engenharia.

Entre *CNTs*, é esperado que as interações entre partículas sejam mais significativas que entre partículas esféricas, mesmo para baixas concentrações. Acredita-se que este último facto se deve à geometria e razões de aspeto que possibilitam a formação de cadeias, como previsto pela teoria do volume excluído (*EVT*).

Lamas *et al.*, 2012, ao estudarem nanofluidos com nanotubos de carbono, concluíram que um nanofluido para ser considerado estável teria de ter uma aglomeração reduzida, pouca sedimentação e integridade estrutural para as condições em estudo.

A aglomeração de partículas pode ser prevenida pelo balanceamento entre as forças atrativas entre partículas por repulsão estática ou estereoquímica (Botha, 2006; Missana e Adell, 2000; Popa *et al.*, 2010).

- A repulsão electroestática pode ser induzida por métodos físicos, como ultrassónicos, moagem de esferas ou corte de alta velocidade (Das, Putra e Roetzel, 2003; Das *et al.*, 2003; Eastman *et al.*, 1996; Xuan e Li, 2000). Estes métodos induzem cargas elétricas na superfície da nanopartícula, garantindo estabilidade cinética. Contudo, estes métodos destroem as nanopartículas. Por exemplo, ao aplicar a *CNT* períodos de radiação ultrassónica, o seu comprimento pode reduzir-se até 65%, enquanto que os outros dois métodos podem causar a abertura das paredes dos *CNTs*, e quanto mais pequenos forem os *CNTs*, pior será a sua capacidade de emaranhar (Hilding *et al.*, 2003);
- A repulsão estereoquímica pode ser aplicada através de métodos químicos, que incluem técnicas de funcionalização covalentes e agentes tensioativos, vão causar uma conversão de hidrofóbica para hidrofílica das paredes das nanopartículas (Banerjee e Wong, 2002; Ghadimi, Saidur e Metselaar, 2011; Huang *et al.*, 2009; Xuan e Li, 2000). Esta alteração é perceptível pois estes métodos alteram o pH das misturas:
 - O método do uso de agentes tensioativos ou dispersantes é o mais fácil e económico de garantir a estabilização das nanopartículas, e por isso a estabilidade dos nanofluidos, mas causa alguns problemas, pois influencia as

propriedades finais da mistura, e podem, entre outros, limitar o melhoramento da condutividade térmica (Chen *et al.*, 2008; Nasiri *et al.*, 2011);

- O método do uso de nanopartículas covalentes funcionalizadas é uma abordagem promissora na produção de nanofluidos, pois são tratamentos que se anexam à superfície das nanopartículas, possibilitando a oxigenação dos grupos funcionais como os grupos carboxílicos e álcoois, alterando o pH da mistura (Esumi *et al.*, 1996; Naseh *et al.*, 2010; Xie e Chen, 2011; Xie *et al.*, 2003);

Os tratamentos químicos também podem causar o encurtamento dos CNTs, dependendo da extensão e intensidade da reação química, e a distribuição do novo tamanho poderá ser determinada depois da funcionalização pela observação da mistura no SEM ou TEM para caracterizar os CNTs resultantes.

Em suma, os fatores que influenciam a estabilidade de nanofluidos são a utilização de ultra-sons, o controlo do pH das nanopartículas para obter um potencial zeta que permita uma suspensão estável e a adição de dispersantes, de forma a evitar a sedimentação.

Para avaliar e caracterizar a estabilidade coloidal dos nanofluidos, podem ser utilizados variados métodos, mas os mais utilizados são os seguintes:

- Análise por absorção espectral, que avalia a sedimentação do nanofluido num dado instante, relacionando a absorção espectral e a concentração de nanopartículas no nanofluido. Como desvantagem, este método não consegue prever a sedimentação a longo prazo (Kim, Bang e Onoe, 2009);
- Potencial zeta, ou potencial eletrocinético, indica o grau de repulsão entre as partículas adjacentes numa mistura, por isso quando um nanofluido possui um potencial zeta elevado, as nanopartículas têm um grau de repulsão elevado, validando a estabilidade da solução. Quando o potencial zeta é baixo, as nanopartículas tendencialmente desagregam-se, sendo por isso possível provar a partir deste fator que as nanopartículas não se aglomeram. No entanto, não é possível prever se existe sedimentação do nanofluido (Huang *et al.*, 2009).

Estes dois métodos são relativamente lentos e em geral requerem a diluição das suspensões, o que faz com que sejam alteradas as interações entre partículas e consequentemente os resultados, por isso é conveniente, o uso de um método de um método mais recente:

- Analisador de estabilidade *LUMiSizer*, que permite averiguar a estabilidade de nanofluidos, e que foi utilizado por Lamas *et al.*, 2012. Neste método, fácil e pouco exigente, é possível estimar o tempo útil de estabilidade do nanofluido, calculando a velocidade de sedimentação, pois as amostras são submetidas a campos centrífugos diferentes (*RCFs*) que permitem acelerar a sedimentação de *MWCNT*, sendo por isso possível calcular a constante de proporcionalidade entre o campo centrífugo e a velocidade de sedimentação.

1.3.3. Propriedades Termofísicas dos Nanofluidos

Tal como anunciado anteriormente, as propriedades termofísicas dos nanofluidos são melhoradas com a adição de nanopartículas, comparativamente com os fluidos convencionais, e o facto de estas partículas terem dimensões à escala nanométrica também possibilita uma melhoria quando comparados com as micropartículas ou mesmo sólidos maciços.

Os nanofluidos têm como propriedades termofísicas mais importantes, entre outras, a condutividade térmica, a massa volúmica, o calor específico e a viscosidade. É sobre esta última que este trabalho de dissertação irá incidir-se, mas nos pontos seguintes irá ser explicada a influência de cada uma no desempenho dos nanofluidos.

➤ **Densidade**

A densidade, ou massa volúmica, é definida como o quociente entre a massa e o volume de uma substância, e a sua importância é devida ao facto de que um aumento excessivo na densidade influencia fortemente a capacidade e eficiência de bombagem num permutador com convecção forçada (ÇENGEL, 2009).

Um estudo efetuado por Vajjha (2009) mostrou concordância entre os dados experimentais e os cálculos teóricos que efetuaram. Nesta investigação foi medida a densidade de nanofluidos com nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de antimónio e óxido de zinco dispersos numa mistura 60:40 de etilenoglicol e água, respetivamente.

Uma investigação conduzida por Sundar *et al.* (2007) que relaciona a variação da densidade com a temperatura mostrou que com o aumento de temperatura a densidade diminuíu e Gangacharyulu (2010) num outro estudo verificou que a densidade nos nanofluidos compostos por nanopartículas de Al_2O_3 dispersas em água tem um valor superior ao do fluido base, aumentando com o aumento da fração de volume das nanopartículas na mistura.

Por último, num estudo de Kumaresan e Velraj (2012) a um nanofluido composto por uma mistura de água e etilenoglicol com uma suspensão de *MWCNT* mostrou-se que a densidade dos nanofluidos aumenta com a concentração de *MWCNT*, isto é, de nanotubos de carbono de parede múltipla. Verificou-se também um desvio relativo aos valores previstos pela correlação de Pak e Cho (1998), que aumenta com o aumento da concentração de *MWCNT*. Esta correlação está de acordo com a teoria da mistura (*mixing theory*) e é dada pela equação:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{fb} + \varphi\rho_p, \quad (1.3)$$

em que as siglas *nf*, *fb* e *p* designam, respetivamente, nanofluido, fluido base e nanopartículas.

Concluindo, a densidade dos nanofluidos varia tendencialmente com o aumento da concentração das nanopartículas e varia inversamente com a temperatura.

➤ Calor específico

O calor específico de uma substância é definido como a variação térmica que uma substância tem quando está sujeita a uma determinada quantidade de calor, e a sua importância deve-se essencialmente ao facto de permitir conhecer a quantidade de energia que um corpo consegue transmitir a outro corpo.

Tipicamente, o calor específico de um nanofluido é menor que o do fluido base, o que implica que, para a mesma temperatura, a energia é menor para o nanofluido. De entre os estudos existentes sobre o calor específico, pode destacar-se um modelo bastante simplificado e que é análogo à teoria da mistura (*mixing theory*). Este é expresso por:

$$c_{p,nf} = (1 - \varphi)c_{p,fb} + \varphi c_{p,p}, \quad (1.4)$$

e foi desenvolvido por Pak e Cho (1998). O segundo modelo (Xuan e Roetzel, 2000), baseado no equilíbrio térmico, é expresso por:

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\varphi)\rho_{fb} c_{p,fb} + \varphi\rho_p c_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (1.5)$$

Ambos os modelos podem ser considerados válidos para estimar o calor específico do nanofluido, no entanto a diferença de resultados entre os dois é demasiado grande para não ser considerada.

Um outro estudo levado a cabo por Nelson, Banerjee e Ponnappan (2009) verificou que o calor específico aumenta com a temperatura e concentração das nanopartículas, tendo sido usado um calorímetro para medir diferentes concentrações de nanopartículas de grafite (0,3%-0,6%) em suspensão num lubrificante (polialfaolefina).

Zhou, Wang e Peng (2009) verificaram em estudo que o calor específico de um nanofluido varia de acordo com o fluido base, tamanho e concentração de nanopartículas.

Num estudo de Vajjha e Das, em 2009, foi medido o calor específico de 3 diferentes nanofluidos, Al_2O_3 e SiO_2 numa mistura de 60:40 de etilenoglicol e água e ZnO em água destilada, a diferentes temperaturas e com diferentes concentrações de nanopartículas, onde se obteve a seguinte correlação:

$$c_{p,nf} = \frac{\left(\frac{A \cdot T}{T_0}\right) + \left(\frac{B \cdot c_{p,p}}{c_{p,fb}}\right)}{C + \varphi}, \quad (1.6)$$

Sendo T a temperatura do fluido, T_0 a temperatura de referência (273 K) e A, B e C os coeficientes de ajuste para os diferentes fluidos em análise.

Relativamente a outras propriedades termofísicas, a investigação sobre o calor específico é ainda limitada. No entanto, é ainda assim possível concluir que o calor específico do nanofluido depende dos fatores:

- Calor específico do fluido base e das nanopartículas;
- Concentração em volume de nanopartículas;
- Temperatura.

A literatura propõe ainda que o calor específico de um nanofluido varia inversamente com a concentração em volume e aumenta com a temperatura (Ramesh e Prabhu, 2011).

➤ **Condutividade Térmica**

A condutividade térmica é uma grandeza física que mede a capacidade de uma substância transferir calor. Representa a taxa temporal de transmissão de energia sob a forma de calor através de um material/substância, medindo-se em W/m.K no sistema internacional. Esta propriedade termofísica, quando associada à nova classe de fluidos em estudo, os nanofluidos, depende de diversos fatores que serão apresentados de seguida.

Entre todas as propriedades termofísicas dos nanofluidos, a condutividade térmica é a que tem reunido maior atenção por parte da comunidade científica, uma vez que estudos efetuados demonstram uma melhoria significativa da condutividade quando comparados com os modelos teóricos existentes (modelos clássicos).

A explicação clássica de condutividade térmica de nanofluidos deriva da *effective medium theory* (EMT) que normalmente envolve a forma da partícula, fração de volume, a condutividade das

partículas e a resistência de Kapitza (Bruggeman, 1935; Davis, 1986; Hamilton e Crosser, 1962; Hashin e Shtrikman, 1962; Hasselman e Johnson, 1987; Jeffrey, 1973). Apesar de este método prever a condutividade térmica para partículas da escala do micrómetro, falha para partículas nanométricas.

A medição da condutividade térmica de líquidos ou soluções é uma operação que se pode tornar difícil, devido à necessidade de estabilizar a temperatura. Por isso, de modo a medir a condutividade térmica dos nanofluidos existem vários métodos que podem ser usados, como o das oscilações de temperatura, das placas paralelas em regime transiente (*steady-state parallel plate*) e a técnica do fio quente transiente (*transient hot-wire*).

Em relação ao método da oscilação da temperatura, este foi desenvolvido por Czarnetzki e Roetzel (1995), sendo unicamente térmico, e os componentes elétricos do aparelho são removidos da zona de teste de modo a que o movimento de íões não tenha influência nas medições.

O método das placas paralelas em regime transiente (*steady-state parallel plate*) mede a condutividade térmica quando a temperatura da mistura não varia com o tempo, e tem como desvantagem que o calor perdido não pode ser medido, o que aumenta a imprecisão do método, e a convecção natural pode ocorrer e levar a valores aparentes altos de condutividade térmica. Este método foi usado por Wang e Mujumdar (2007), para medir a condutividade térmica de Al_2O_3 e em água destilada (AD), etilenoglicol (EG) e óxido de etileno (EO), registando um erro inferior a 3%.

Finalmente, o método de fio quente (*transient hot-wire technique*) é o mais usado pois minimiza os efeitos da radiação, convecção natural e perdas de calor. Este método consiste num fio metálico que é usado como aquecedor e termómetro, estando este último dentro de uma camada não condutora de electricidade (devido à boa condutividade eléctrica que os nanofluidos geralmente têm). Este fio estará suspenso no líquido a medir, sendo a condutividade térmica calculada através de uma derivação da lei de Fourier. Zhang, Gu e Fujii (2007) usaram este método, mas utilizaram um fio curto (*short-hot-wire*) de modo a minimizar a influência de cargas estáticas e da condutividade de nanopartículas.

De modo a estudar os fatores que influenciam a condutividade térmica e referindo bibliografia relativamente recente, Jahanshahi e Hosseinizadeh (2010) estudaram a condutividade térmica de um fluido constituído por SiO_2 em água usando o método do fio quente, e verificaram que a

condutividade do nanofluido aumentou linearmente com o aumento da concentração de nanopartículas. Paul, Pal e Manna (2010), ao usarem a mesma metodologia, também confirmaram a conclusão da investigação anterior, e acrescentaram que a diminuição do tamanho médio das partículas aumenta a condutividade térmica do nanofluido.

Yu *et al.* (2010), ao estudarem o efeito da temperatura na condutividade térmica de um nanofluido de Cu em etilenoglicol, verificaram que a condutividade aumentou com o aumento de temperatura. Habibzadeh (2010), ao estudar esse mesmo efeito e o efeito do pH da mistura para um nanofluido de SnO₂ em água verificou que para baixas concentrações de nanopartículas a temperatura e o valor de pH fazem com que a condutividade térmica do fluido aumente.

De forma a estudar o efeito e a importância das nanopartículas na condutividade térmica de um nanofluido, Hwang *et al.* (2006) utilizaram nanotubos de carbono de múltiplas paredes (*MWCNT*) e nanopartículas de óxido de cobre (CuO) e dióxido de silício (SiO₂) em diferentes fluidos base, como a água, etilenoglicol e óleo mineral, e concluíram que os nanotubos de carbono em nanofluidos fazem com que estes tenham uma condutividade térmica superior aos restantes constituídos por outro tipo de partículas.

Relativamente aos nanofluidos constituídos por *MWCNT* numa mistura de etilenoglicol e água, nanofluido que irá ser usado nesta investigação, Lamas *et al.* (2011), usando o método de fio quente transiente para a medição da condutividade térmica, estudaram a variação desta propriedade com a temperatura e verificaram que a condutividade térmica aumentou cerca de 7% com 1,5%vol de *MWCNT* e anteviram que o movimento browniano não seria o único fenómeno que leva ao aumento da condutividade térmica verificado.

Ainda sobre o nanofluido a ser estudado nesta dissertação, foi realizada uma simulação numérica para verificar a influência do tamanho, razão de aspeto, flexibilidade estrutural e movimento Browniano nas interações entre partículas de *MWCNTs* em suspensão, pelo que Lamas *et al.*, 2013, concluiu que não é o movimento Browniano e a flexibilidade estrutural de *CNT* a influenciar essas interações, mas sim as dimensões, geometria e relação entre superfície e volume.

- **Movimento Browniano**

Ao movimento completamente aleatório das partículas suspensas num fluido dá-se o nome movimento Browniano, e deve-se às colisões das partículas em suspensão com as moléculas do fluido onde estas estão dispersas. A intensificação deste movimento das partículas é proporcional à temperatura da mistura, o que está de acordo com a teoria cinética das partículas. Uma

investigação levada a cabo por Keblinski e Phillpot (2002) sugere que este movimento maior ou menor leva à transferência de energia molecular e por isso ao aumento da condutividade térmica. A eficiência do movimento Browniano é inversamente proporcional ao aumento da viscosidade.

- **Modelos clássicos da condutividade térmica**

Através das pesquisas de muitos investigadores, foi possível constatar que a condutividade térmica dos nanofluidos depende de muitos fatores, como a condutividade térmica do fluido base, o tipo e geometria de nanopartículas que compõem o nanofluido e a sua concentração no mesmo, os seus movimentos e a temperatura do nanofluido. Assim, os investigadores ao longo dos últimos anos foram tentando modelar o comportamento destes novos fluidos de um modo analítico, sendo Maxwell o primeiro a apresentar um modelo para a condutividade térmica de suspensões homogêneas de partículas macroscópicas, como se pode observar na tabela seguinte, onde k_p representa a condutividade térmica das partículas sólidas, k_{fb} a condutividade térmica do fluido base e φ a fração volúmica das partículas na suspensão.

Tabela 1.2: Sumário dos principais estudos sobre condutividade térmica

| Modelo | Autor | Características |
|--|----------------------------|---|
| $k_{nf} = k_{fb} \frac{k_p + 2k_{fb} + 2(k_p - k_{fb})\varphi}{k_p + 2k_{fb} - (k_p - k_{fb})\varphi} \quad (1.7)$ | (Maxwell, 1881) | Negligencia as partículas não esféricas, ignorando fatores dimensionais e o movimento das partículas na suspensão (Browniano), apresentando valores de condutividade térmica subestimados |
| $k_{nf} = k_{fb} \frac{k_p + (n - 1)k_{fb} + (n - 1)(k_p - k_{fb})\varphi}{k_p + (n - 1)k_{fb} - (k_p - k_{fb})\varphi} \quad (1.8)$ | (Hamilton e Crosser, 1962) | Inclui o grau de esfericidade das partículas, sendo $n = 3$ para nanopartículas esféricas |
| $k_{nf} = \varphi k_p + (1 - \varphi)k_{fb} \quad (1.9)$ | (Bhattacharya, 2004) | Considera a influência do movimento Browniano das partículas |

| | | |
|---|-------------------------------|--|
| $k_{nf} = k_{fb} \frac{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_p}{k_p - k_{fb}} \ln\left(\frac{k_p + k_{fb}}{2k_{fb}}\right)}{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_{fb}}{k_p - k_{fb}} \ln\left(\frac{k_p + k_{fb}}{2k_{fb}}\right)}$ <p style="text-align: right;">(1.10)</p> | (Xue, 2005) | Modelo para nanofluidos de nanotubos de carbono (CNTs) |
| $k_{nf} = \frac{(k_p - k_{lr}) \varphi k_{lr} + (2\beta_1^3 - \beta^3 + 1) + (k_p + 2k_{lr})\beta_1^3(\varphi\beta^3(k_{lr} - k_{fb}) + k_{fb})}{\beta_1^3(k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\varphi(\beta_1^3 - \beta^3 + 1)}$ <p style="text-align: right;">(1.11)</p> | (Leong, Yang e Murshed, 2006) | Modelo para nanopartículas esféricas, onde $\beta = \frac{t}{r}$, $\beta_1 = \frac{t}{2r}$ |
| $k_{nf} = k_{fb} \frac{k_{pe} + 2k_{fb} + 2\varphi(k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3}{k_{pe} + k_{fb} - \varphi(k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3}$ <p style="text-align: right;">(1.12)</p> | (Yu e Choi, 2003) | k_{pe} corresponde à condutividade térmica equivalente das nanopartículas calculado por Schwartz1995 |
| $k_{pe} = k_p \frac{[2(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)]\gamma}{-(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)}$ <p style="text-align: right;">(1.13)</p> | | |
| $k_{nf} = \frac{(k_p - k_{lr}) \varphi k_{lr}(2\beta_1^2 - \beta^2 + 1) + (k_p + 2k_{lr})\beta_1^2(\varphi\beta^2(k_{lr} - k_{fb}) + k_{fb})}{\beta_1^2(k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\varphi(\beta_1^2 - \beta^2 + 1)}$ <p style="text-align: right;">(1.14)</p> | (Murshed, Leong e Yang, 2008) | Modelo usado para nanopartículas de geometria cilíndrica |
| $k_{nf} = k_{fb} \times \left[1 + \frac{\varphi(2\beta_{xx} + \beta_{zz})}{3 - \varphi(2\beta_{xx}L_{xx} + \beta_{zz}L_{zz})} \right]$ <p style="text-align: right;">(1.15)</p> | (Lamas, 2013) | Modelo desenvolvido para nanofluidos constituídos por AD-EG e MWCNTs |

1.3.4. Viscosidade

A viscosidade descreve a resistência interna do escoamento de um fluido e é uma propriedade termofísica muito importante para todas as aplicações térmicas envolvendo fluidos (Nguyen *et al.*, 2007). Como exemplos, a potência das bombas está diretamente relacionada com a viscosidade, as quedas de pressão são diretamente proporcionais à viscosidade e para além disso, o coeficiente de transferência de calor é também influenciado pela viscosidade. Por estes motivos, a viscosidade é tão importante como a condutividade térmica em sistemas envolvendo escoamento de fluidos e a caracterização desta propriedade torna-se, assim, decisiva no dimensionamento de sistemas de engenharia.

Muito poucas pesquisas foram desenvolvidas sobre a viscosidade de nanofluidos de *CNT*, embora a viscosidade seja uma propriedade relevante e que deve ser tomada em linha de conta na análise do desempenho de um nanofluido. No entanto, a literatura tem reportado alguns estudos considerando o comportamento reológico de outros nanofluidos, que serão aqui considerados e analisados também. Para essa análise ter-se-á em conta algumas variáveis na viscosidade, nomeadamente a temperatura, geometria da nanopartícula, concentração das nanopartículas no fluido base e taxa de corte.

1.3.4.1. Efeito da temperatura na viscosidade

Relativamente ao efeito da temperatura na viscosidade de um nanofluido, existem algumas pesquisas publicadas. Dependendo do tipo de fluido em estudo, podem-se ter diferentes reações com a temperatura, o que leva a comportamentos reológicos diferentes, que são representados por modelos distintos.

Yang *et al.* (2005) mediram experimentalmente o efeito da temperatura na viscosidade usando as temperaturas de 35, 43, 50 e 70°C para 4 nanofluidos constituídos por nanopartículas de grafite. Com este estudo mostraram que a viscosidade cinemática diminui com o aumento da temperatura. Foram feitas outras observações interessantes, como o facto da viscosidade de 2% de grafite em ATF a 35 e a 70°C ter o valor de 41,4 e 12,2 cST, respetivamente.

Chen *et al.* (2008) mediram o efeito da temperatura de *MWCNT* em água destilada, com um intervalo de temperaturas entre os 5 e os 65°C, e verificaram que a viscosidade relativa aumenta significativamente com a temperatura, acima de 55°C.

Nguyen *et al.* (2007, 2008) estudaram o efeito da temperatura na viscosidade em misturas de Al_2O_3 em água e CuO em água num intervalo de temperatura entre os 21 e os 75°C, pelo que concluíram que a viscosidade destes nanofluidos diminuem com a temperatura. À mesma conclusão chegaram Anoop *et al.* (2009), ao estudarem a viscosidade de CuO em etilenoglicol, Al_2O_3 em etilenoglicol e Al_2O_3 em água, para intervalos de temperatura dos 20 aos 50°C e uma concentração volúmica de nanopartículas na mistura de 0,5, 1, 2, 4 e 6%. Um outro estudo efetuado para TiO_2 em água provou a mesma conclusão anterior, para um intervalo de temperaturas de 15 a 50°C (Duangthongsuk e Wongwises, 2009).

Turgut *et al.* (2009) estudaram a condutividade térmica e viscosidade de TiO_2 em água desionizada para os intervalos de 13 aos 55°C de temperatura e de 0,2 a 3% de fração de volume de nanopartículas no volume total do nanofluido, e concluíram que a viscosidade diminui com o aumento de temperatura.

Kole e Dey (2010) investigaram sobre o nanofluido de alumina em líquido de refrigeração automóvel nos intervalos de temperatura de 10°C a 50°C e de fração de volume de 0,1% a 1,5% e mais uma vez verificaram que à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade do nanofluido diminui. Pastoriza-Gallego *et al.* (2011) verificaram, num intervalo entre 10 e 50°C, que a temperatura diminui com a viscosidade e que a 323,15K (50°C), CuO em água com 10% de fração de volume de nanopartículas em água tem a mesma viscosidade que a água a 288,15K (15°C). Lee

et al. (2011) também estudaram o efeito da temperatura na viscosidade em SiC com água destilada, chegando à conclusão recorrente.

Namburu *et al.* (2007) mostraram que a viscosidade diminui exponencialmente com o aumento de temperatura para um intervalo de -35 a 50°C, e mostraram também que o nanofluido contendo SiO₂ numa mistura de etilenoglicol e água tem um comportamento reológico correspondente a um modelo de fluido não-Newtoniano a baixa temperatura, e a alta temperatura comportou-se como um fluido Newtoniano, contudo um outro estudo desta equipa (Namburu *et al.*, 2007) concluiu que este nanofluido possui um comportamento de um fluido Newtoniano, em todo o seu intervalo de temperaturas considerado na investigação anterior, com uma fração de volume situada entre os 0 e os 6,12% de nanopartículas, sendo que a viscosidade decresce exponencialmente com a temperatura. Esta última conclusão também é corroborada por Kulkarni, Das e Vajjha (2009), que analisaram, para o mesmo intervalo de temperaturas, CuO, Al₂O₃ e SiO₂ com o fluido base composto por uma mistura de água e etilenoglicol. Também Naik *et al.* (2010) mostraram experimentalmente uma diminuição exponencial de viscosidade com o aumento da temperatura, num nanofluido de CuO/PG-água.

Ainda sobre o efeito da temperatura na viscosidade de um nanofluido, foram obtidas as mesmas conclusões anteriores num estudo realizado num nanofluido constituído por nanotubos de carbono (CNTs) em água numa faixa de temperaturas até aos 40°C (Ding *et al.*, 2006). Aladag *et al.* (2012), numa outra investigação, mediram a viscosidade para dois nanofluidos de Al₂O₃ e CNT num fluido base de água em baixa concentração de partículas e a baixa temperatura, de 2 a 10°C, e com um reómetro com controlador de tensão e equipado por placas paralelas acima e abaixo da curva de tensão de corte, verificando as conclusões obtidas por todos os outros estudos.

Contudo, uma outra investigação levada a cabo por Prasher contradiz todas as anteriores, indicando que a viscosidade de um fluido é independente da temperatura (Prasher *et al.*, 2006). No entanto, este autor parece ter sido o único a fazer tal afirmação e posteriormente não há mais trabalhos que atestam a veracidade da mesma.

1.3.4.2. Efeito da forma e tamanho da partícula na viscosidade

São raros os estudos existentes sobre o efeito do tamanho das nanopartículas na viscosidade de um nanofluido. Nguyen *et al.* (2007) estudaram o nanofluido constituído por Al₂O₃ em água e observaram que os efeitos do tamanho das partículas se tornam mais importantes quanto maior for a percentagem de volume de nanopartículas. De facto, os seus estudos mostraram que, para

baixas concentrações em volume (abaixo dos 4%), as viscosidades do nanofluido são aproximadamente iguais, quando as partículas têm 36nm e 47nm, enquanto que para altas concentrações de partículas no fluido, a viscosidade do nanofluido quando as partículas são de 36nm é maior do que com partículas de dimensão de 47nm.

Num outro estudo, Nguyen *et al.* (2008) clarificou que o valor da viscosidade para as partículas de dimensão de 36nm é 5% menor que o valor associado às partículas de 47nm, e concluiu que o efeito do tamanho das nanopartículas é de maior importância para uma fração de volume mais elevada, como 7% e 9%.

He *et al.* (2007) publicaram um estudo em que a viscosidade de corte aumenta com o tamanho das partículas, resultado que provém da medida de TiO_2 em água destilada para diferentes concentrações e para três tamanhos diferentes de partículas, 95, 145 e 210 nm.

Contudo, nem todos os estudos chegaram à mesma conclusão quanto ao efeito do tamanho das nanopartículas na viscosidade de um nanofluido, pois Lu e Fan (2008) estudaram Al_2O_3 em água e etilenoglicol para diferentes tamanhos de partículas e, usando métodos experimentais e numéricos, concluíram que a viscosidade diminui com o aumento do diâmetro das partículas e, para diâmetros maiores que 30 nm, a variação da viscosidade de corte é praticamente nula. Os mesmos resultados foram obtidos por Anoop, Sundararajan e Das (2009) usando dois tamanhos (45 e 150 nm) de partículas de Al_2O_3 para uma concentração de 2%, 4% e 6% de nanopartículas em água. Chevalier, Tillement e Ayela (2007) mediram a viscosidade de SiO_2 com etanol como fluido base, para três diferentes diâmetros de partículas de 35, 94 e 190 nm e concluíram também que a viscosidade diminui com o aumento do tamanho de partículas. À mesma conclusão chegou uma investigação realizada para 3 diferentes tamanhos de nanopartículas de SiO_2 (20, 50 e 100nm) (Namburu *et al.*, 2007).

Pastoriza-Gallego *et al.* (2011) também estudaram o efeito do tamanho das nanopartículas e a sua concentração em volume na viscosidade de um nanofluido de CuO em água. Esta equipa usou 2 amostras de CuO de dimensão no intervalo 23-37 nm e outra de 11 ± 3 nm de diâmetro e mediram a viscosidade de ambas para um intervalo de concentração em volume de 0-10% com um intervalo de temperaturas de 283,15 a 323,15 K e concluíram que a amostra que contém nanopartículas de menor tamanho tem maior viscosidade, que vai diminuindo com o aumento do tamanho das partículas.

Uma diferente conclusão das anteriores foi também publicada. De facto, Prasher *et al.* (2006) indicam que a viscosidade do nanofluido não depende exatamente do diâmetro/dimensão das nanopartículas, pois estes autores estudaram nanopartículas de Al_2O_3 de 27, 40 e 50 nm dispersas em etilenoglicol e verificaram que a viscosidade varia anormalmente pouco com o diâmetro das partículas, quando comparados com os estudos anteriores.

Relativamente à forma das nanopartículas e o seu efeito na viscosidade de um nanofluido, existem muito poucos estudos publicados na literatura. No entanto, a viscosidade pode ter uma forte dependência da forma da partícula, como concluíram Timofeeva, Routbort e Singh (2009), mostrando que partículas longas como placas ou cilindros conferem maior viscosidade, para a mesma fração de volume.

1.3.4.3. Efeito da fração volúmica de nanopartículas na viscosidade de um nanofluido

Embora haja contradições sobre os efeitos da temperatura e do tamanho das partículas na viscosidade de um nanofluido, não há dúvidas quanto à concentração de nanopartículas e o seu efeito nesta tão importante propriedade termofísica dos nanofluidos. Todos os investigadores e artigos disponíveis consideraram e provaram que a viscosidade dos nanofluidos aumenta com o aumento da fração volúmica de nanopartícula em suspensão no fluido base convencional.

Das, Putra e Roetzel (2003) e Putra, Roetzel e Das (2002) provaram o comportamento segundo o modelo de fluido Newtoniano do nanofluido constituído por Al_2O_3 em água com uma concentração entre 1% e 4% de volume de nanopartículas e mostraram que a viscosidade aumenta com o acréscimo desta concentração de nanopartículas no fluido. Prasher *et al.* (2006) verificaram também que proporcionalmente a viscosidade aumenta quando a fração de nanopartículas no volume da solução também aumenta, além de provar que a viscosidade aumenta cerca de 10 vezes com o aumento da fração de nanopartículas no volume da solução. Chevalier, Tillement e Ayela (2007) mediram a viscosidade de SiO_2 em etanol à temperatura ambiente para 3 tamanhos de nanopartículas de 35, 94 e 190 nm e para frações de nanopartículas em volume entre 1,4% e 7%, e observaram que a viscosidade cresce anormalmente com o aumento da concentração de nanopartículas.

Chen *et al.* (2008) relataram um aumento da viscosidade depois de um certo intervalo de fração de volume que é inferior a 0,4%, o que implica que os nanofluidos abaixo deste valor têm uma viscosidade menor que os fluidos base correspondentes, devido ao efeito lubrificante das

nanopartículas. Mas a viscosidade aumenta com o carregamento de nanopartículas quando a fração de volume é maior que 0,4%. Lu e Fan (2008) estudaram a viscosidade de Al_2O_3 numa mistura de água e etilenoglicol para diferentes concentrações de nanopartículas na solução e, tanto usando métodos experimentais como numéricos, descobriram que a viscosidade deste nanofluido aumenta quando a concentração de partículas também aumenta. À mesma conclusão chegaram Nguyen *et al.* (2008), que ao estudarem a viscosidade de um nanofluido constituído por partículas de Al_2O_3 de 36nm em água com concentrações de 1%, 4%, 9% e 12% de partículas no volume da solução, fizeram com que a viscosidade relativa aumentasse para, respetivamente, 1,12, 1,6, 3 e 5,3, e com um tamanho de partículas de diâmetro de 47 nm para concentrações de 2,1%, 4,3%, 8,5% e 12,2% a viscosidade relativa aumenta, respetivamente, 1,1, 1,4, 2 e 3,1.

1.3.4.4. Efeito do fluido base na viscosidade de nanofluidos

A viscosidade de um nanofluido é obviamente dependente da do fluido térmico que lhe serve de base. Alguns investigadores usam água, etilenoglicol, propileno-glicol, misturas de etilenoglicol e água e propileno-glicol e água como base de preparação dos nanofluidos, e mostraram que a viscosidade do nanofluido é extremamente dependente da viscosidade do fluido base usado.

Chen *et al.* (2007, 2009, 2008) foram autores de várias investigações sobre este tema, nas quais prepararam nanofluidos constituídos por *MWCNT* em vários fluidos diferentes, como água, etilenoglicol, glicerina e óleo de silicone e verificaram que a base de etilenoglicol e a de glicerina diminuem a viscosidade do nanofluido, principalmente quando a temperatura deste é superior a 50°C. Também num outro estudo, prepararam um nanofluido constituído por nanopartículas de TiO_2 considerando etilenoglicol e água como fluidos base e mediram uma melhoria máxima de viscosidade de 23% com 1,86% de concentração em EG e uma melhoria de 11% com a concentração de 1,2% de nanopartículas num volume de água. Chen *et al.* (2009) efetuaram ainda um estudo semelhante aos anteriores com a preparação de um nanofluido composto por *TNTs* (nanotubos de titânio), considerando a água ou EG como fluidos base. Deste último estudo verificou-se uma melhoria da viscosidade de 82% com 0,6% de volume de partículas num nanofluido com etilenoglicol e uma melhoria de 70,96% com uma concentração de 1,86%vol.

Wang, Xu e S. Choi (1999) consideraram como fluidos base a água e etilenoglicol na preparação de um nanofluido com nanopartículas, e verificaram uma melhoria máxima da viscosidade de 86% para 6% de concentração de partículas em água e 39% com uma concentração de 3,5% em volume de etilenoglicol. Yu *et al.* (2011) também estudaram este efeito num nanofluido constituído por partículas de nitrato de alumínio disperso em EG e PG, pelo que mediram que

para uma concentração de 0,1% de nanopartículas em volume de nanofluido, verificaram uma melhoria de 1,195% com etilenoglicol e de 1,375% com propileno-glicol. Finalmente, Syam Sundar *et al.*, 2012 estudaram 3 diferentes proporções do fluido base constituído por uma mistura de etilenoglicol e água (20-80%, 40-60% e 60-40%, respetivamente) e com nanopartículas de Fe_3O_4 . Com este estudo, a equipa observou uma melhoria de 296% com a mistura na proporção de 60-40% de etilenoglicol e água, quando comparados com as outras proporções da mistura, explicando assim que a viscosidade do nanofluido é fortemente dependente da viscosidade do fluido base.

1.3.4.5. Efeito da taxa de corte na viscosidade

Nesta secção é possível verificar qual o efeito da taxa de corte na viscosidade dos nanofluidos, compostos por nanotubos de carbono submetidos a uma funcionalização covalente, por meio de várias investigações que foram realizadas ao longo dos últimos anos.

Kinloch, Roberts e Windle, 2002, mediram a viscosidade de um nanofluido constituído por um nanotubos de carbono com 11nm de diâmetro e 910 nm de comprimento e água destilada, pelo que ao analisar as propriedades de corte, estático e dinâmico, verificaram que no primeiro caso as amostras se comportaram como um pseudoplástico (ver secção 1.2) e no segundo caso, em que há uma dependência em relação ao tempo, a amostras comportaram-se como um fluido tixotrópico, para concentrações superiores a 4,5%vol de *CNT*.

Também Ko *et al.* (2007) chegaram à conclusão de que o fluido se comporta como um pseudoplástico ao analisar diferentes concentrações de *CNTs* funcionalizados em água destilada, com taxas de corte entre os 0.01 e os 100 s^{-1} . Assumiram então que quando as partículas têm geometrias tubulares ou em fio, encontradas por exemplo nos polímeros, os nanofluidos apresentam um comportamento típico de um fluido não-Newtoniano devido ao rearranjo da direção das partículas na direção do escoamento. Conclusões semelhantes foram encontradas por Han *et al.*, em 2011, pela investigação do comportamento reológico de nanofluidos constituídos por pó de carbono num intervalo de concentrações entre os 4,4 e os 7,7%vol em água destilada. Estes investigadores observaram, para todas as amostras, um comportamento típico de um pseudoplástico, que se evidencia quanto maior a concentração de partículas. No entanto, atribuíram este comportamento devido à separação dos agregados aquando do aumento da taxa de corte.

Ponmozhi e Gonçalves, em 2010, na sua investigação, chegaram a diferentes resultados quando comparados com as investigações referidas anteriormente. De facto, ao estudar 7 tipos de concentrações diferentes de nanotubos de carbono com diâmetros entre os 50 e os 80 nm e de 10 a 20 μm de comprimento dispersos em água, a taxas de corte entre os 0 e os 600 s^{-1} e temperaturas ente os 298 e os 315 K, puderam concluir que até 100 s^{-1} e uma concentração de CNTs de 1,5%vol o nanofluido se comporta como um fluido pseudoplástico. No entanto, para taxas de corte superiores a 200 s^{-1} , a viscosidade destes fluidos aumenta com a taxa de corte, deduzindo assim um comportamento de um fluido dilatante.

Contudo, alguns investigadores chegaram a conclusões diferentes no que diz respeito ao comportamento da viscosidade dos fluidos com a taxa de corte, nomeadamente Xu *et al.*, 2005, e Chen *et al.*, 2011, e concluíram que se comportam de acordo com um fluido newtoniano. Em relação à primeira investigação, Xu *et al.*, 2005, estudaram o comportamento de 6 concentrações (de 0.5%vol a 5%vol) de nanofibras de carbono de diâmetros de 100-200nm e 5-20 μm de comprimento, suspensos numa solução aquosa de 90% de glicerina e verificaram uma viscosidade quase constante, quaisquer que fossem as taxas de corte, denunciando um comportamento típico de um fluido newtoniano. Já Chen *et al.*, 2011, investigaram o comportamento de MWCNTs dispersos numa solução aquosa de etilenoglicol e glicerol, num intervalo de taxas de corte de 1 a 130 s^{-1} e mostraram que as amostras têm um comportamento Newtoniano para todas as concentrações. No entanto, a baixas concentrações de MWCNTs no nanofluido (0.002%vol) a viscosidade é mais baixa que a da solução base devido ao efeito lubrificante dos nanotubos de carbono.

À mesma conclusão destes últimos de que os nanofluidos se comportam como fluidos Newtonianos também chegaram Meng *et al.* (2012) e Beheshti, Shanbedi e Heris (2014). Em relação aos primeiros, usaram nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNTs) em concentrações volúmicas de 0,5 a 4% em etilenoglicol para constatar esse comportamento relativamente à taxa de corte, enquanto que os segundos utilizaram o mesmo tipo de partículas mas em concentrações menores (de 0,001 a 0,01%vol) e noutro tipo de fluido base, o óleo.

1.3.4.6. Modelos analíticos de viscosidade

A viscosidade é definida como a resistência entre duas camadas de um fluido. Esta propriedade dinâmica pode ser então estimada através do uso de modelos analíticos. Inicialmente, foi Einstein (1906) quem criou um modelo baseado na hipótese de um fluido que contém suspensões de partículas esféricas ter um comportamento linear relativamente à viscosidade:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\varphi), \text{ com } \varphi < 0,02\%, \quad (1.16)$$

Onde μ_{nf} é a viscosidade da suspensão e μ_{fb} a viscosidade do fluido base, enquanto φ corresponde à fração volúmica de nanopartículas no fluido base. Este modelo tem algumas limitações, como o facto da concentração das partículas não ser tão reduzida e o facto de não ter em conta que a interação das partículas entre si, e entre o fluido base, também afetam a viscosidade da mistura. Em 1952, Brinkman estendeu o modelo de Einstein de modo a ser usado em fluido com maior concentração de nanopartículas na solução. Assim, para $\varphi < 4\%$:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 - \varphi)^{2,5} \quad (1.17)$$

Krieger e Dougherty (1959) derivaram uma relação semi-empírica para a viscosidade de corte para um grande intervalo de concentrações de partículas e obtiveram o seguinte modelo:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_m} \right) \right)^{-\eta\varphi_m}, \quad (1.18)$$

onde φ_m é a fração de partículas no volume da solução, que se situa entre 0,495 e 0,54 em condições de repouso, e é aproximadamente 0,605 para altas taxas de corte; η é a viscosidade intrínseca, cujo valor para esferas é de 2,5. Este modelo foi modificado por (Chen *et al.*, 2007) devido aos efeitos de acondicionamento variável das partículas:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 - \left(\frac{\varphi_a}{\varphi_m} \right) \right)^{-2,5\varphi_m}, \quad (1.19)$$

$$\text{com } \varphi_a = \varphi \left(\frac{a_a}{a} \right)^{3-D}, \quad (1.20)$$

em que a_a e a são os raios das partículas agregadas e primárias, e D é uma constante com o valor típico de 1,8 para nanofluidos.

Outro modelo foi apresentado por Frankel e Acrivos (1967), onde φ_m é a fração de volume máxima medida experimentalmente:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \times \frac{9}{8} \left(\frac{(\varphi/\varphi_m)^{\frac{1}{3}}}{1 - (\varphi/\varphi_m)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (1.21)$$

Lundgren (1972) propôs uma correlação baseada na série de Fourier para a concentração de partículas:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 + 2,5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2 + f(\varphi^3) \right) \quad (1.22)$$

Considerando o efeito devido ao movimento Browniano das partículas numa suspensão isotrópica de partículas rígidas e esféricas, Batchelor (1977) propôs o modelo com a seguinte expressão:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\varphi + 6,5\varphi^2) \quad (1.23)$$

Esta última equação é válida para uma concentração $\varphi \leq 0,1$, onde o movimento das nanopartículas e as suas interações são dominantes. Pôde-se observar nestas últimas equações que se os termos de grau superior a 2 forem ignorados, estes modelos tornam-se iguais à correlação de Einstein, no qual foram baseados.

Em 1981, Graham propôs um modelo generalizado da correlação de Frankel e Acrivos (1967), incluindo os raios das partículas (d_p) e as distâncias entre elas (h), assim como a concordância com o modelo de Einstein para baixas concentrações, e é expresso por:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 + 2,5\varphi + 4,5 \times \frac{1}{(h/d_p)(2+h/d_p)(1+h/d_p)^2} \right) \quad (1.24)$$

No mesmo ano, Kitano, Kataoka e Shirota propuseram um modelo simples para estimar a viscosidade de uma mistura bifásica:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_m} \right) \right)^{-2} \quad (1.25)$$

Wang, Xu e S. Choi (1999) publicaram um modelo para prever a viscosidade dos nanofluidos da seguinte forma:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 7,3\varphi + 123\varphi^2) \quad (1.26)$$

Em 2003, Tseng e Lin criaram um modelo em que traçaram a viscosidade relativa com a concentração de partículas a uma taxa de corte de $\gamma = 100s^{-1}$ e verificaram que a relação entre os dois parâmetros é exponencial num nanofluido constituído por TiO_2 em água.

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \times 13,47^{35,98\varphi} \quad (1.27)$$

Dependendo do estado físico das fases de uma mistura, são possíveis diferentes formas de representar a concentração. Segundo Fullman (1991), uma solução sólido-sólido pode ser representada por $\lambda = \frac{2}{3}d_p \left(\frac{1-\varphi_p}{\varphi_p} \right)$, sendo φ_p a fração volúmica das partículas na solução. Baseado neste modelo, e aplicando-o num nanofluido, Neto (1999) propôs uma correlação que é dada por:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(\frac{a}{\lambda^n} \right), \quad (1.28)$$

onde a e n são constantes.

Em 2007, Chen *et al.* relacionaram a viscosidade de corte do nanofluido com a viscosidade do líquido base para uma concentração até 10%vol e com uma incerteza menor que 6%, pelo que chegaram à seguinte correlação, tendo em conta os dados experimentais medidos:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 10,6\varphi + (10,6\varphi)^2) \quad (1.29)$$

Com esta investigação, concluíram que a viscosidade relativa aumenta em função da concentração das partículas independentemente da temperatura, sendo esta correlação significativamente distinta do modelo base de Einstein (Einstein, 1906).

Ainda em 2007, Nguyen *et al.* (a, b e c) mostraram que os modelos de Batchelor, 1977 e Brinkman, 1952 sobrestimam as viscosidades dos nanofluidos, exceto para baixas concentrações de partículas, pois os resultados experimentais eram bastante distintos dos obtidos pelos modelos teóricos. Por isso, propuseram duas correlações para partículas de dimensões de 47nm e 36nm de Al_2O_3 em água, dadas respetivamente pelas equações seguintes:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \times 0,904 \times e^{0,1482\varphi} \quad (1.30)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 0,025\varphi + 0,015\varphi^2) \quad (1.31)$$

Além disso, também consideraram que o modelo de Batchelor (1977) era inadequado para calcular a viscosidade do nanofluido constituído por CuO em água, pelo que propuseram a correlação seguinte:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1,475 - 0,319\varphi + 0,051\varphi^2 + 0,009\varphi^3) \quad (1.32)$$

Avsec e Oblak, em 2007 também criaram um modelo matemático para estimar a viscosidade dos nanofluidos. Para isso, tiveram como referência o modelo exponencial de Ward (Cheng e Law, 2003) e de Einstein (1906). No que concerne ao primeiro modelo, dava bons resultados para nanopartículas grandes (maiores que 100nm) mas verificaram que erros com desvios maiores que 100%, quando comparados com os dados experimentais, para partículas de dimensão mais reduzida. O novo modelo foi então denominado de renovado modelo Ward (RW):

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\varphi_e + (2,5\varphi_e)^2 + (2,5\varphi_e)^3 + \dots), \quad (1.33)$$

onde φ_e é a fração volúmica efetiva, dada pela expressão $\varphi_e = \varphi \left(1 + \frac{h}{r}\right)^3$, onde h representa a espessura do líquido.

Pak e Cho, em 1998, relacionaram também a viscosidade dos nanofluidos com a viscosidade do fluido base e a concentração de nanopartículas na mistura. Estes investigadores tomaram como referência a temperatura ambiente e criaram a seguinte expressão:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 39.11\varphi + 533.9\varphi^2) \quad (1.34)$$

Mais recentemente, em 2014, Syam Sundar *et al.* publicaram um estudo onde investigaram propriedades termofísicas de nanofluidos de Al_2O_3 numa mistura de água destilada e etilenoglicol, entre as quais a viscosidade, e chegaram à seguinte expressão:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \times A \times e^{B\varphi}, \quad (1.35)$$

Onde,

Tabela 1.3: Constantes associadas ao modelo de Syam Sundar et al.(2014)

| | A | B |
|---------------|--------|-------|
| 20% EG | 0,9299 | 67,43 |
| 40% EG | 0,9396 | 24,13 |
| 60% EG | 1,1216 | 77,56 |

Muitas das equações anteriores relacionam a viscosidade com a concentração de partículas. Contudo, a temperatura é um fator com bastante influência na viscosidade, pelo que existem modelos na literatura para estimar a viscosidade em relação à temperatura para alguns tipos de nanofluidos.

Uma correlação entre viscosidade e temperatura para fluidos puros foi apresentada por White, em 1991:

$$\ln\left(\frac{\mu_f}{\mu_0}\right) \approx a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2, \quad (1.36)$$

Onde μ_0 e T_0 são valores de viscosidade e de temperatura de referência, respetivamente, e a , b e c são valores adimensionais tabelados por esta equipa de investigadores, que dependem do tipo de fluido.

Ainda sobre o efeito da temperatura na viscosidade, Reid, Prausnitz e Poling (1987) publicaram a seguinte correlação:

$$\mu_{nf} = A e^{B/T} \quad (1.37)$$

Neste modelo, A e B são constantes que dependem das concentrações de partículas. Um outro modelo reológico foi apresentado por Yaws, em 1977:

$$\log(\mu_{nf}) = A + BT^{-1} + CT + DT^{-2}, \quad (1.38)$$

Onde A, B, C e D são parâmetros de ajuste. Em 2006, Kulkarni criou um modelo que relaciona a viscosidade de um nanofluido composto por óxido de cobre (CuO) em água com a concentração dessas partículas, num intervalo de temperaturas entre os 5 e os 50°C, e que é dado pela seguinte equação:

$$\ln(\mu_{nf}) = A \left(\frac{1}{T} \right) - B, \quad (1.39)$$

Onde A e B são constantes relacionadas com a percentagem em volume de partículas no coloide. Esta correlação não é aplicada em nanofluidos com temperaturas abaixo dos 0°C.

Namburu *et al.* (2007) relacionaram os seus dados experimentais com alguns modelos existentes na literatura, mas face à não correspondência entre os seus resultados e os modelos existentes, esta equipa criou um modelo com um alto coeficiente de correlação ($R^2 > 0,99$), dado pela seguinte equação para um nanofluido de óxido de cobre:

$$\log(\mu_{nf}) = Ae^{-BT} \quad (1.40)$$

As constantes A e B da equação anterior estão relacionadas com a concentração em volume de partículas (φ):

$$A = 1,8375\varphi^2 - 24,643\varphi + 165,56, \text{ com } R^2 = 0,9873 \quad (1.41)$$

$$B = 4 \times 10^{-6}\varphi^2 - 0,001\varphi + 0,0186, \text{ com } R^2 = 0,988 \quad (1.42)$$

e em que φ varia entre 0 e 6,12% e o desvio máximo do modelo teórico para os dados foi de $\pm 8,8\%$.

Abu-Nada (2009) também criou uma correlação que relaciona a viscosidade dos nanofluidos com a temperatura destes e com a concentração de nanopartículas, baseado nos resultados experimentais de Nguyen *et al.* (2007). A relação é dada por:

$$\mu_{nf_{Al_2O_3}} = -0,155 - \frac{19,582}{\bar{T}} + 0,794\varphi + \frac{2094,47}{\bar{T}^2} - 0,192\varphi^2 - 8,11 \frac{\varphi}{\bar{T}} - \frac{27463,863}{\bar{T}^3} + 0,0127\varphi^3 + 1,6044 \frac{\varphi^2}{\bar{T}} + 2,1754 \frac{\varphi}{\bar{T}^2} \quad (1.43)$$

Este modelo dá estimativas da viscosidade completamente distintas em relação aos resultados quando comparado com o modelo de Brinkman (Brinkman, 1952).

Alguns modelos relacionam simultaneamente os efeitos do diâmetro das partículas com o da concentração de partículas e temperatura, como é o caso do modelo de Masoumi (2009), que é baseado no movimento Browniano. Este modelo pode ser usado para calcular a viscosidade efetiva através da temperatura, diâmetro médio das nanopartículas e a sua concentração em volume da solução, a sua densidade e propriedades físicas do fluido base. Este modelo é traduzido pela equação:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} + \frac{\rho P V_B d_p^2}{72 C \delta}, \quad (1.44)$$

Onde ρ é a densidade, d_p é o diâmetro das nanopartículas, δ é a distância entre as nanopartículas, V_B e C são constantes calculadas em função da temperatura:

$$V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18 K_b T}{\pi \rho P d_p}}, \quad (1.45)$$

onde K_b é a constante de Boltzmann; C é um fator de correção que corresponde a

$$C = \mu_{fb}^{-1} \left((c_1 d_p + c_2) \varphi + (c_3 d_p + c_4) \right), \quad (1.46)$$

onde c_1, c_2, c_3 e c_4 são constantes. A equipa calculou este modelo com base nos resultados experimentais de um nanofluido de Al_2O_3 de 13nm (Pak e Cho, 1998) e 28nm (Wang, Xu e S. Choi, 1999) em água.

Outro modelo que junta na mesma expressão propriedades físicas como a concentração de partículas e a temperatura foi desenvolvido por Kulkarni (2006), e é válido para modelos com dependência da temperatura, em intervalos de 5°C a 50°C:

$$\ln(\mu_{nf}) = -(2.8751 + 53,548\varphi - 107.12\varphi^2) + (1078,3 + 15857\varphi + 20587\varphi^2) \left(\frac{1}{T}\right) \quad (1.47)$$

Também Yiamsawas *et al.* (2013) criaram uma correlação com dependência da temperatura e da concentração das partículas. Para isso mediram a viscosidade de nanofluidos constituídos por nanopartículas de Al_2O_3 e TiO_2 suspensas numa mistura de água destilada e etilenoglicol na proporção 80:20 e chegaram à seguinte expressão:

$$\mu_{nf} = A \times \varphi^B \times T^C \times \mu_{fb}^D, \quad (1.48)$$

Em que:

$A = 0,837931, B = 0,188264, C = 0,089069, D = 1,100945$ para nanopartículas de TiO_2

$A = 0,891842, B = 0,739192, C = 0,099205, D = 0,9844$ para nanopartículas de Al_2O_3

Por último, Hosseini (2010) apresentou um modelo com um grupo adimensional para determinar a viscosidade de um nanofluido considerando a concentração de nanopartículas, a sua dimensão, e o efeito da camada de “nivelamento” (capping layer) e da temperatura. Para determinar os parâmetros deste modelo usaram o método de regressão quadrática, e usaram os dados experimentais de Nguyen *et al.* (2008), sendo por isso um modelo válido para este tipo de nanofluidos (de Al_2O_3) em estudo. Assim:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \exp\left(m + \alpha\left(\frac{T}{T_0}\right) + \beta(\varphi_h) + \gamma\left(\frac{d}{1-\tau}\right)\right), \quad (1.49)$$

onde φ_h é a fração de volume de sólido na solução, d é o diâmetro das nanopartículas, n é a espessura da camada de nivelamento, T_0 é a temperatura de referência, T é a temperatura medida, m é um fator dependente das propriedades do sistema, como as nanopartículas sólidas, o fluido base e as interações entre eles, e α , β e γ são constantes experimentais determinadas a partir dos dados experimentais usados.

Atualmente, nenhum modelo consegue estimar com precisão a viscosidade de um nanofluido num intervalo relativamente amplo de concentrações de nanopartículas, nem prever um modelo reológico, ou seja, um modelo que consiga relacionar com precisão o comportamento da viscosidade com a temperatura. Por isso, com esta investigação pretende-se chegar a um modelo reológico de modo a se conseguir modelar o comportamento de um nanofluido constituído por nanotubos de carbono (CNTs) dispersos numa solução constituída por uma mistura de água e etilenoglicol (EG).

2. Materiais e Métodos

2.1. Síntese do capítulo

Neste capítulo, é apresentada a metodologia experimental usada para medir a viscosidade do nanofluido em estudo e para avaliar os fatores pelos quais esta se rege. São também descritos os componentes que constituem o aparato experimental, assim como a metodologia global de preparação dos nanofluidos, tendo-se dado particular atenção à forma de funcionalização e dispersão das nanopartículas no fluido base. Assim, de modo a aferir a qualidade das partículas usam-se: *FTIR* para averiguar a estrutura química, *TGA* para avaliação do comportamento térmico e imagens *SEM* de modo a aferir a distribuição no tamanho dos nanotubos de carbono que compõem o nanofluido em estudo.

2.2. Nanofluidos de “*MWCNT*”

Os nanofluidos térmicos são dispersões de nanopartículas sólidas em fluidos térmicos de permuta convencionais. Estes podem ser considerados coloides, já que a fase dispersa é composta por dimensões na ordem dos 10^{-10} m a 10^{-6} m. Geralmente, o líquido e as partículas constituintes do nanofluido são designados por fase contínua e dispersa, respetivamente, e por vezes quando estas fases são difíceis de distinguir uma da outra, os coloides têm o aspeto de soluções.

Como foi comprovado no capítulo anterior, existe bastante literatura publicada sobre este tipo de fluidos, embora esta diminua quando se foca no tipo de fluidos compostos por nanotubos de carbono de parede múltipla (*MWCNT*). Sendo este tipo de fluido considerado promissor, tanto de um ponto de vista teórico como prático, interessa que as suas propriedades térmicas sejam conhecidas, pois está-se em crer que o seu potencial se deve à forma alongada das nanopartículas (em forma de tubo) que o constituem, assim como à melhor condutividade térmica do carbono, e consequentemente dos *MWCNT*.

A produção dos nanofluidos térmicos com propriedades termofísicas melhoradas possibilita o projeto de permutadores de calor mais pequenos e leves, o que melhora substancialmente a eficiência energética dos processos industriais associados. De modo a garantir que estes nanofluidos se tornem na próxima geração de fluidos de transferência de calor, é necessário que as suas propriedades sejam constantes, ou seja, há que garantir que estes fluidos sejam estáveis. Neste contexto, o termo estabilidade descreve então a qualidade das propriedades termofísicas efetivas serem independentes de mudanças e variações de comportamento e da distribuição

espacial das partículas no fluido num determinado período de tempo e, não menos importante, é necessário reduzir fatores de ruído, assegurando uma boa repetibilidade de resultados e portanto uma melhor dedução dos resultados medidos.

Assim, as três principais condições de estabilidade são:

- Garantir a total dispersão das nanopartículas, impedindo a aglomeração das mesmas;
- Evitar a separação de fases, ou seja, criar um fluido homogéneo;
- Garantir uma estrutura das nanopartículas geometricamente constante.

2.3. Desenho de Experiências

Como foi referido no capítulo 1, a intenção desta dissertação é contribuir para a comunidade científica com um estudo aprofundado sobre a viscosidade dos nanofluidos de *MWCNT* numa solução composta por água destilada e etilenoglicol em diferentes proporções, contribuindo, de algum modo para a desmistificação do comportamento reológico destes fluidos. Para isso, pretende-se que esse comportamento seja levado a efeito sobre um desenho de experiências que visou a construção de uma base de dados representativa do problema em análise.

Existem fatores que influenciam as propriedades termofísicas dos nanofluidos e que foram também investigados no decorrer deste trabalho. São eles a geometria das nanopartículas (dimensões e razões de aspeto), a fração volúmica destas no fluido base, o tipo de fluido base (as concentrações de cada componente pertencente ao fluido base) e a temperatura do nanofluido. Na tabela seguinte (tabela 2.1) estão sumariadas as relações expectáveis entre os fatores identificáveis e os mecanismos que controlam as propriedades termofísicas dos nanofluidos (Lamas, 2013). (O efeito da agregação das partículas e da transferência de calor não são contabilizados, pois são aqui considerados desprezáveis).

Tabela 2.1: Relação esperada dos fatores de controlo com os mecanismos que governam as propriedades termofísicas de um fluido (i.e. condutividade térmica) (adaptado de (Lamas, 2013)).

| | Literatura Científica | | Teorias Clássicas | |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | Movimento Browniano | Estrutura de Nano-camadas | Distribuição espacial | Interação interparticular |
| Geometria nanoparticular | X | X | X | X |
| Fração de volume | X | X | X | X |
| Fluido base | X | X | | |
| Temperatura | X | | | |

Como é possível constatar pela observação da tabela, o movimento Browniano das partículas depende da viscosidade do fluido base, da temperatura, da geometria das nanopartículas, desde que afetem a sua razão de aspeto, massa e coeficiente de arrasto e a fração de volume de nanopartículas na solução. Este último aumenta a interação entre partículas, o que pode dificultar o seu movimento. A estrutura ordenada de multicamadas das moléculas do fluido base próximo de uma superfície sólida podem ser afetadas pela geometria das nanopartículas, devido às diferentes razões de aspeto das mesmas, pela concentração das nanopartículas em volume de solução, que aumenta a densidade de superfícies sólidas no nanofluido, e pelas propriedades termofísicas do fluido base, que podem produzir nanocamadas de diferentes espessuras. Além destes, a distribuição espacial e a interação dinâmica entre partículas dependem da geometria dos *MWCNT* e da sua flexibilidade estrutural, fração de volume e movimento Browniano (Lamas, 2013).

Na tabela seguinte (tabela 2.2) estão explicitados os diferentes tipos de nanopartículas de *MWCNT* usados também nesta investigação, com as suas geometrias, fornecedores e principais características físicas, à semelhança do que foi usado em Lamas, 2013 nos estudos de condutividade térmica.

Tabela 2.2: Designação dos vários tipos de nanopartículas e suas principais características (adaptado de (Lamas, 2013)).

| Designação | Fabricante | Resíduos [wt.%] | Pureza [wt.%] | ρ_{CNT} [kg/m ³] | l_p/d_p |
|---------------|----------------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|-----------|
| d50-80 l10-20 | Cheaptubes Inc. | <1.5 | >95 | 2160 | 231 |
| d60-100 l5-15 | Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. | <3.0 | >97 | 2160 | 125 |
| d60-100 l1-2 | Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. | <3.0 | >97 | 2160 | 19 |
| d20-40 l10-30 | Cheaptubes Inc. | <1.5 | >95 | 2160 | 667 |
| d20-40 l5-15 | Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. | <3.0 | >97 | 2160 | 333 |
| d20-40 l1-2 | Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. | <3.0 | >97 | 2160 | 50 |

Esta descrição das partículas pode ser sumariada pelas suas distribuições de diâmetros, $d_p < 50$ e $d_p > 50$, que é cruzada pelos diferentes comprimentos das partículas de $l_p = 1 - 2$, $l_p = 5 - 15$ e $l_p > 15$, características que são usadas para denominar o tipo de nanopartículas que estão a ser utilizadas. Os tamanhos das nanopartículas foram escolhidos de modo a abranger um grande intervalo de dimensões, tanto em termos de diâmetro como de comprimento, de modo a permitir uma melhor interpolação e posterior análise.

Embora as partículas tenham sido adquiridas a diferentes fabricantes, todas foram produzidas pelo mesmo processo, por deposição catalítica de vapor químico (CCVD), aferindo uma estrutura e propriedades termofísicas idênticas (Lamas, 2013).

Em linha com a geometria dos *MWCNT*, a fração volúmica de nanopartículas no fluido base é outro importante fator de controlo da viscosidade. Foram selecionados cinco diferentes frações de volume de concentração entre os 0,25 e os 1,5%vol, nomeadamente 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 e 1,5%vol, esperando-se que sejam suficientes e capazes de avaliar o comportamento do nanofluido. É sabido que a viscosidade é um parâmetro importante em termos práticos na transferência de calor, e por isso mesmo foi definido o limite máximo de fração volúmica de nanopartículas de 1,5%vol no presente estudo, para que o nanofluido continue a ser capaz de transferir calor de uma forma eficiente. Carece ainda dizer que as nanopartículas têm custos bastante elevados associados, devendo ser cautelosa a sua utilização.

Relativamente ao fluido base, este produz alterações nas propriedades termofísicas da mistura, o que infere diferenças significativas nos resultados. No caso do movimento Browniano produzir algum efeito nos resultados, pode ser importante verificar este efeito pela variação de viscosidade na mistura. Nestas medições experimentais, foram então selecionados dois fluido base diferentes, mais concretamente soluções aquosas com 30% e 60% de concentração de etilenoglicol. Estas soluções são geralmente usadas em aplicações de transferência de calor devido às suas propriedades anticongelantes, de baixa corrosão e lubrificantes, além de que como o etilenoglicol é mais viscoso que a água às mesmas condições ambientais, a exatidão dos resultados poderá ser melhorada (Lamas, 2013).

Como foi referido no capítulo anterior, vários investigadores evidenciam uma relação entre a viscosidade e a temperatura, pois o aumento desta acelera o movimento Browniano das partículas e conseqüentemente a interação entre partículas e, por isso, nesta investigação foram levados a cabo testes a nanofluidos a 7 temperaturas diferentes, entre as quais 283,15K, 293,15K, 298,15K, 303,15K, 313,15K, 323,15K e 333,15K (10°C, 20°C, 25°C, 30°C, 40°C, 50°C e 60°C).

Na tabela 2.3 encontram-se listados todos os tipos de nanofluidos testados, com as variações de geometria das nanopartículas, concentração volúmica, temperatura e tipo de fluido base utilizado.

Tabela 2.3: Fatores de controlo e suas variações na investigação efetuada.

| Fatores de controlo | MWCNT | Fluido Base | ϕ [%] | Temperatura [K] |
|---------------------|---------------|-------------|------------|-----------------|
| | A | B | C | D |
| Nível 1 | d50-80 l10-20 | DW+30%EG | 0.25 | 283.15 |
| Nível 2 | d60-100 l5-15 | DW+60%EG | 0.50 | 293.15 |
| Nível 3 | d60-100 l1-2 | - | 0.75 | 298.15 |
| Nível 4 | d20-40 l10-30 | - | 1.00 | 303.15 |
| Nível 5 | d20-40 l5-15 | - | 1.50 | 313.15 |
| Nível 6 | d20-40 l1-2 | - | - | 323.15 |
| Nível 7 | - | - | - | 333.15 |

Observando a tabela anterior, é possível constatar que nesta investigação irão ser estudados 420 tipos de nanofluidos, que posteriormente serão analisados. No entanto, a falta de coerência experimental e a impossibilidade de efetuar as medições necessárias em tempo útil, que carecem ser repetidas em trabalhos futuros, não foram aqui consideradas como inibidoras do trabalho em curso. Concluindo, nesta dissertação foram tidos em conta os dados experimentais relativamente às partículas de dimensão d20-40 l1-2, d20-40 l10-30 e d60-100 l1-2 para um fluido base constituído por uma solução aquosa de 30% de concentração de etilenoglicol e d20-40 l5-15, d20-40 l10-30 e d60-100 l1-2 para uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol, nas concentrações de 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1% e 1,5% de volume de partículas na solução.

2.4. Funcionalização das nanopartículas

Os fluidos base usados na preparação dos nanofluidos são soluções aquosas com diferentes concentrações de etilenoglicol, sendo estas soluções solventes polares. Por isso, é necessário transformar as superfícies hidrofóbicas das nanopartículas de *MWCNT* prístino em superfícies hidrofílicas, de modo a evitar as agregações destas partículas ou serem misturadas no fluido base. A melhor abordagem para criar uma superfície hidrofílica é através de uma funcionalização covalente. Dentro da funcionalização covalente, a técnica mais comum são os tratamentos oxidativos, que são capazes de adicionar grupos oxigenados funcionais aos tubos, como os grupos carboxílicos e álcoois. Estas técnicas têm como vantagem o facto de não ser necessário o uso de dispersantes para nanofluidos de transporte.

Por este motivo, nesta investigação os *MWCNT* prístinos foram funcionalizados por uma metodologia proposta por Esumi *et al.*, 1996. Assim, foram preparados 50ml de cada nanofluido contendo *MWCNT*. A concentração volúmica de nanopartículas no nanofluido gerado é dada pela seguinte expressão:

$$\varphi = \frac{\frac{m_{CNT}}{\rho_{CNT}}}{\frac{m_{CNT}}{\rho_{CNT}} + V_{bf}} \times 100 \quad (2.1)$$

A expressão anterior (equação 2.1) sugeriu a medida de um volume distinto do fluido base, dependendo da fração de volume do nanofluido. Adicionalmente, esse volume pode tornar-se difícil de medir devido à magnitude da graduação dos recipientes onde foram preparados e guardados estes nanofluidos, induzindo erros ao sistema. Por isso, o V_{bf} ($V_{AD} + V_{EG}$) considerou-se 50 ml, e o volume total do nanofluido aproximadamente 50ml, dependendo da fração de volume das nanopartículas.

Na tabela seguinte, estão apresentadas as quantidades de nanopartículas necessárias para produzir as amostras, para cada geometria de *MWCNT* testada. A quantidade total de *MWCNT* calculada foi majorada em 50% para evitar alguma dispersão e deve ser repetida se o fenómeno ocorrer. Além disso, de acordo com Esumi *et al.*, 1996, é também esperada uma perda de cerca de 35 a 40% do peso dos *MWCNT* prístinos durante a sua funcionalização.

Tabela 2.4: Substâncias e suas quantidades na preparação das amostras medidas.

| Fluido base | φ | V_{AD} [ml] | V_{EG} [ml] | m_{CNT} [g] | $\Delta\varphi$ |
|-------------|-----------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| AD + 30%EG | 0,25% | 35 | 15 | 0,271 | 0,01% |
| | 0,50% | 35 | 15 | 0,543 | 0,02% |
| | 0,75% | 35 | 15 | 0,816 | 0,03% |
| | 1,00% | 35 | 15 | 1,091 | 0,04% |
| | 1,50% | 35 | 15 | 1,645 | 0,06% |
| AD + 60%EG | 0,25% | 20 | 30 | 0,271 | 0,01% |
| | 0,50% | 20 | 30 | 0,543 | 0,02% |
| | 0,75% | 20 | 30 | 0,816 | 0,03% |
| | 1,00% | 20 | 30 | 1,091 | 0,04% |
| | 1,50% | 20 | 30 | 1,645 | 0,06% |
| Total | - | - | - | 8,730 | - |

O processo de tratamento dos *MWCNT* prístinos, para todas as geometrias, é descrito nos passos seguintes (Esumi *et al.*, 1996) (Lamas, 2013):

- Dentro do vidro de relógio, foi medida a massa 20 g de *MWCNT* prístinos e transferidos para uma proveta de 5 litros;

- Depois, foram misturados com 200 ml de ácido nítrico (HNO_3) e 600 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), portanto numa razão de volume de 1:3. Esta mistura perfaz em média, 40 ml de ácido por grama de *MWCNT*, como sugerido por investigadores que anteriormente já realizaram o mesmo procedimento nas nanopartículas (Chen *et al.*, 2004; Esumi *et al.*, 1996; Kanagaraj, Ponmozhi e Varanda, 2008; Ponmozhi *et al.*, 2010; Veingnon *et al.*, 2011; Xie e Chen, 2011; Xie *et al.*, 2003; Zhou, Xu e Shi, 2008)
- A mistura foi então mantida em ebulição durante 30 minutos a 413,15 K numa placa elétrica com um agitador magnético;
- No fim da reação química, a mistura foi deixada arrefecer num intervalo de tempo de 24 horas e foi diluída com água destilada;
- As partículas foram lavadas intensamente com água destilada até às partículas em suspensão não conterem sinais de acidez. Quando necessário, as partículas são lavadas com um centrifugador (Heraeus Multifuge 1L) de modo a separar os restos de ácidos das partículas. Neste passo, os grupos carboxílicos já estão ligados à superfície dos *MWCNT*, sendo impossível alcançar o pH da água destilada (≈ 7) (Shim, Park e Ryu, 2001; Xie *et al.*, 2003).
- Os *MWCNT* limpos foram recolhidos e secos a 373,15 K num forno, tornando-se partículas duras.
- Por último, as nanopartículas secas foram pulverizadas com um moinho analítico (*analytical miller*).

Na figura 2.1, são retratadas imagens de microscopia eletrónica de *MWCNT* prístinos e *MWCNT* funcionalizados. Nesta figura, é possível perceber que os *MWCNT* prístinos estão altamente emaranhados, ou contrário do que acontece com os *MWCNT* funcionalizados, que estão dispersas. Além disso, deve ser notado que esta não indica se a distribuição relativamente ao tamanho das partículas dispersas é igual ao dos *MWCNT* prístinos.

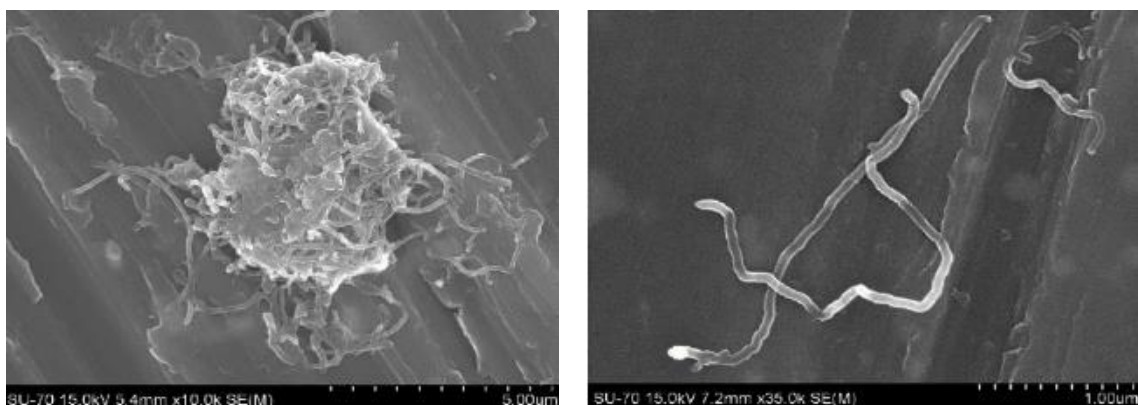


Figura 2.1: Imagem SEM de *MWCNTs* prístinos (a) e funcionalizados (b) (adaptado de Lamas, 2013)

2.4.1. Qualidade da funcionalização dos MWCNT

Como se pôde constatar, é necessário funcionalizar as nanopartículas de *MWCNT* para produzir nanofluidos. Nesta subsecção poder-se-á caracterizar experimentalmente e avaliar a qualidade destas partículas funcionalizadas.

2.4.1.1. Identificação dos grupos funcionais produzidos

A espectroscopia infravermelha da transformada de Fourier (*FTIR*) foi feita em *MWCNT* puros e funcionalizados, de modo a identificar os grupos funcionais que ficaram ligados à superfície após a funcionalização. Este método de análise por *FTIR* usa luz infravermelha para localizar as amostras e observar os seus componentes químicos. Durante esta análise, é registado um espectro de absorção, fornecendo dados sobre a estrutura química e molecular do material em teste. Como foi referido, para reduzir a aglomeração das nanopartículas, estas foram funcionalizadas de um modo covalente com grupos carboxílicos (-COOH), que aumentaram as forças repulsivas de van der Waals. Assim, pretende-se verificar a formação destes compostos nas superfícies destas nanopartículas.

As medições *FTIR* foram efetuadas com o auxílio do espectrómetro num intervalo de 400 a 4000 cm^{-1} , sendo o espectro final resultado da média de três medições com uma resolução de 4 cm^{-1} . Cada espectro foi capturado em 256 scans.

Na figura 2.2 estão representados os espectros obtidos através da análise por *FTIR* para *MWCNT* prístinos e funcionalizados. Como pode ser observado, todas as amostras apresentam um pico próximo de 1630 cm^{-1} , que representa as ligações de carbono (C=C) (Rahimpour *et al.*, 2012), sugerindo que a integridade destas partículas não foi alterada pelo tratamento químico a que as nanopartículas foram sujeitas. O pico no intervalo de 1150 a 1210 cm^{-1} está associado à ligação carbono-oxigénio (C-O) devido aos grupos carboxílicos, o pico próximo de 1150 cm^{-1} identifica a ligação O-H e o pico em 1710 cm^{-1} corresponde ao alongamento da ligação C=O (Kim, Han e Hong, 2008; Peng *et al.*, 2003; Rahimpour *et al.*, 2012; Shaffer, Fan e Windle, 1998; Xie *et al.*, 2003; Zhang, Gu e Fujii, 2007). Estes resultados demonstram a qualidade do procedimento.

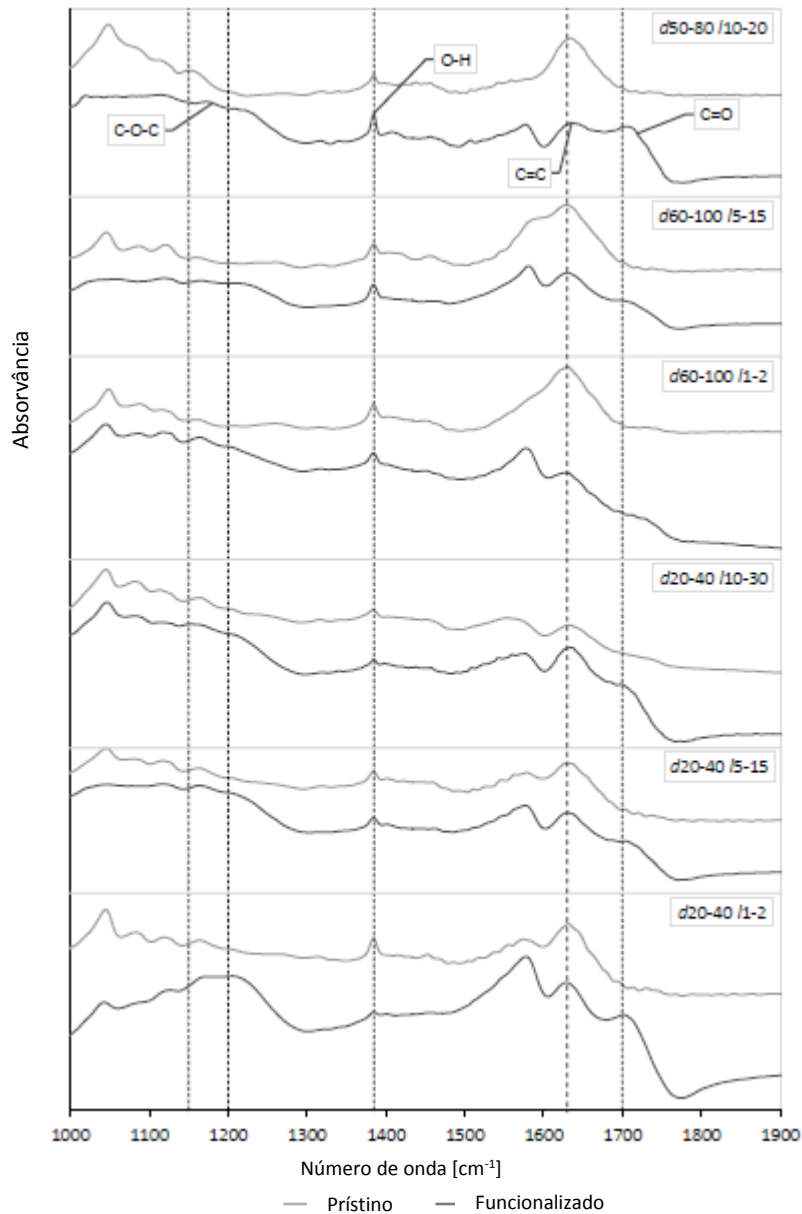


Figura 2.2: Espectro de FTIR comparando MWCNT prístinos e funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013)

2.4.1.2. Avaliação do comportamento térmico

Já foi visto que a estrutura dos *MWCNT* funcionalizados pode ser analisada por *FTIR*, mas também pode ser usada a visualização e análise de imagens *SEM* (microscopia eletrónica de varrimento). Além disso, a análise termo-gravimétrica (*TGA*) é usada para avaliar o comportamento térmico e a estabilidade dos *MWCNT* funcionais a alta temperatura e, não menos importante, avaliar os possíveis perigos estruturais derivados da tecnologia de funcionalização usada, que pode decompor as partículas quando a temperatura de teste é alterada. A degradação negligente da estrutura dos *MWCNT* a uma temperatura de medição distinta garante condições de ensaio

constantes relativamente à morfologia estrutural e distribuição espacial das amostras durante as medições, avaliando possíveis fatores de ruído a temperaturas mais elevadas.

A análise *TGA* mede a perda de massa de uma amostra em função da temperatura, indicando a taxa de decomposição das amostras, sendo por isso comparadas as curvas de perda de massa dos *MWCNT* prístinos com os funcionalizados. Estas medições foram efetuadas com o aparelho SETSYS Setaram DSC-TG, que mede a perda de massa a uma taxa de aquecimento de 0,1 a 100K/min, com uma resolução de 0,002µg, num intervalo de temperaturas de 293,15K a 2673,15K (Setaram, 2013).

É conhecido que a taxa de aquecimento influencia a temperatura de decomposição da amostra, ou seja, para uma alta taxa de aquecimento, a temperatura de decomposição pode ser ligeiramente aumentada. Apesar disso, a linha tendência da perda de massa é similar, e uma vez que não se destina a identificar especificamente a temperatura de degradação mas sim a possível degradação e danos estruturais, pode ser selecionada uma taxa média de aquecimento de cerca de 10K/min (Hsieh *et al.*, 2010; Talaei *et al.*, 2011).

Além disso, as medidas provenientes da análise *TGA* são fortemente influenciadas pela atmosfera. O azoto assegura uma atmosfera inerte, que providencia dados com maior fiabilidade em relação à degradação estrutural das nanopartículas com a temperatura do que uma atmosfera rica em óxidos, uma vez que se destina a prever o comportamento térmico e possíveis danos estruturais dos *MWCNT* funcionalizados dispersos num meio fluídico. Uma atmosfera rica em oxigénio certamente reagirá mais rapidamente com os grupos funcionais e oxidará os *MWCNT*, decompondo-os rapidamente. Portanto, uma atmosfera inerte permite avaliar os fenómenos de degradação dos nanotubos de carbono com a temperatura.

Na figura 2.3 é possível verificar que as nanopartículas funcionalizadas têm uma maior tendência a degradar-se com o aumento da temperatura, apesar de no intervalo considerado a perda não ter sido superior a 10%. Este valor pode indicar a presença de algumas impurezas ou fragmentos que não foram eliminados durante o tratamento de funcionalização e que podem facilmente degradar-se com o aumento da temperatura, sendo posteriormente evaporados.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

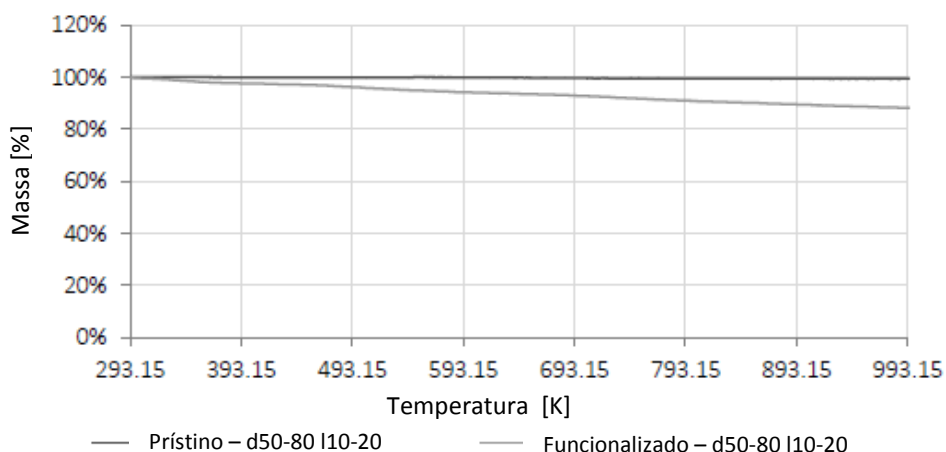


Figura 2.3: Gráfico da análise TGA e consequente comparação entre MWCNT prístinos e funcionalizados (d50-80 I10-20) (adaptado de Lamas, 2013)

Em relação ao MWCNT prístino, foi possível verificar uma perfeita estabilidade em todas as temperaturas do intervalo considerado.

Na tabela seguinte (tabela 2.5), é possível verificar a perda de massa dos nanotubos de carbono a 2 temperaturas distintas, pelo que se pode observar a sua evolução.

Tabela 2.5: Perda de massa medida por TGA a 323,15K e 1023,15K, para MWCNT funcionalizados (adaptado de Lamas, 2013)

| Nanopartícula | Perda de massa a 323,15K | Perda de massa a 1023,15K |
|---------------|--------------------------|---------------------------|
| d50-80 I10-20 | -0,8% | -12,0% |
| d60-100 I5-15 | -1,2% | -16,9% |
| d60-100 I1-2 | -0,4% | -5,8% |
| d20-40 I10-30 | -0,9% | -9,7% |
| d20-40 I5-15 | -1,3% | -15,6% |
| d20-40 I1-2 | -0,7% | -10,7% |

Na temperatura mais baixa, por vezes, considera-se que a perda de massa é negligenciável, o que indica estabilidade térmica nas condições de análise, que é de grande importância de modo a garantir que as amostras possam apresentar morfologia e condições estruturais semelhantes em condições experimentais normais, reduzindo os erros associados.

2.4.1.3. Avaliação da distribuição de tamanhos das nanopartículas

Embora o método de dispersão possibilitar a produção de dispersões de não-aglomerados de MWCNT em solventes polares, é reconhecido que a funcionalização covalente dada a estas nanopartículas causa a degradação da geometria das nanopartículas, nomeadamente no que diz

respeito à redução do comprimento (Hilding *et al.*, 2003). Portanto, a distribuição de tamanhos das nanopartículas diferem do que foi anunciado pelo fabricante e por isso não podem ser aplicada nos modelos preditivos.

A literatura destaca uma série de técnicas que podem ser usadas para avaliar o tamanho das partículas a uma escala nanométrica, tais como difração a laser, espalhamento dinâmico de luz, crivagem, sedimentação, microscopia, entre outros. Mas, para uma completa descrição da nanopartícula, é necessário conhecer o seu comprimento e diâmetro, sendo que a maioria das técnicas anteriormente enumeradas têm custos proibitivos e não são 100% eficazes.

Nesta investigação, as distribuições de tamanho de *MWCNT* foram avaliadas através de microscopia, nomeadamente SEM (microscopia eletrónica de varrimento) e respetiva análise de imagens (Lamas, 2013). Em relação à SEM, esta técnica permite verificar a superfície das amostras através de um eletrão de alta energia, o que com o varrimento forma a imagem. Estas imagens formadas possibilitam a observação da estrutura e dimensões das partículas.

Para determinar o diâmetro e o comprimento das partículas foi usado o aparelho Hitachi SU-70, que deve ser operado num ambiente em vácuo, e portanto as partículas devem estar secas. Para as secar, estas são dispersas em etanol em baixas concentrações. Gotas dessa dispersão são de seguida depositadas sobre a superfície de suporte das amostras e são deixadas a secar. Depois as amostras são pulverizadas com carbono para assegurar a condutividade dos eletrões.

Seguidamente, várias imagens de cada amostra de partículas para análise e medição devem idealmente ser sujeitas a uma etapa de processamento de imagem, utilizando software adequado. Porém, para este processamento seria necessário que as partículas estivessem isoladas, e de preferência de um modo estendido, pelo que se torna difícil combinar estes 2 fatores, o que faz com que provoque ruídos indesejáveis na análise automática de imagens e conseqüentemente necessidade de acompanhamento permanente dessa análise. Concluindo, a medição da distribuição de tamanhos de *MWCNT* dispersos foi realizado manualmente, utilizando um software livre de CAD, o DraftSight da Dassault Systèmes (Lamas, 2013).

Para minimizar o erro associado, foram repetidas as medições e análises de imagens várias vezes, assumindo que o erro tem uma distribuição normal. Como já foi mencionado, as distribuições de tamanho de *MWCNT* foram mensuradas através de uma análise intensiva de imagens SEM, como as que estão representadas na figura 2.4. No entanto, pode notar-se que as medições foram efetuadas em imagens projetadas, o que induz um certo grau de incerteza, nomeadamente no

que diz respeito à estimativa do comprimento das nanopartículas devido à natureza tridimensional das estruturas analisadas. Mesmo assim, esta metodologia permite a avaliação das distribuições das duas dimensões na escala nanométrica. Para cada tipo de partícula são estudadas um grande número de imagens de modo a obter um resultado o mais preciso e exato possível.

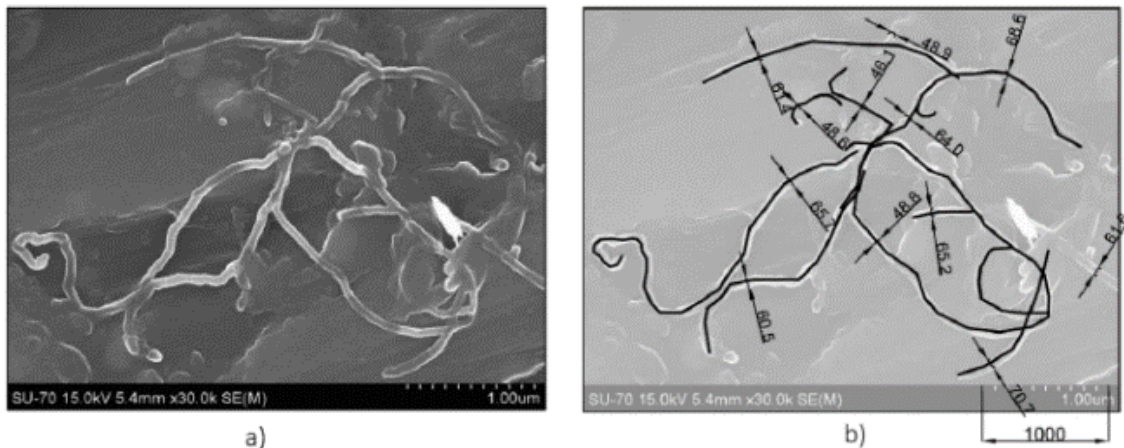


Figura 2.4: Ilustração de uma imagem SEM de uma dispersão de MWCNTs (a) e representação esquemática do procedimento de medida usado (b) (adaptado de Lamas, 2013)

2.5. Metodologia da dispersão

Os *MWCNT* funcionalizados com as etapas descritas anteriormente são armazenados num dissecador. Através disto, foi evitado o ganho de humidade, que altera a densidade efetiva das nanopartículas que contribuem como fatores de ruído/erros.

Outros autores usaram este método para a funcionalização de *MWCNT* e reportaram bons resultados relativamente à sua dispersão, como foi o caso de Chen e Saltiel, 2004; Esumi *et al.*, 1996; Kanagaraj, Varanda e Fonseca, 2008; Ponmozhi e Gonçalves, 2010; Veingnon e Chuminjak, 2011; Xie *et al.*, 2003; Zhou, Xu e Shi, 2008.

Os passos seguintes são referentes ao processo final de produção de nanofluidos de *MWCNT* numa solução aquosa (Lamas, 2013):

1. Com uma balança de alta precisão ($\Delta m=0,001g$) foi medida a massa total de partículas necessárias ao nanofluido (tabela 2.4);
2. Com uma proveta graduada ($\Delta V=0,5ml$), foi medido cada tipo de fluido base (tabela 2.4);
3. A solução foi homogeneizada a olho nu por um agitador magnético num período curto de tempo;

4. No agitador magnético, foi aplicada energia ultrassônica de 12,5 kJ no Bioblock Scientific Vibra-Cell 75043 “sonicator” com 20kHz \pm 50Hz a uma amplitude de 20% e com uma baixa intensidade da sonda de cavitação, permitindo a libertação de energia numa grande área. Contudo, as sondas com grande intensidade de cavitação libertam energia numa área menor, aumentando a probabilidade das partículas de *MWCNT* sofrerem uma degradação mais acentuada;
5. A mistura foi arrefecida naturalmente durante 5 minutos;
6. Foram repetidos os passos 4 e 5 mais 3 vezes, até à energia ultrassônica perfazer 50 kJ, ou seja, 1 kJ/ml de nanofluido.

Os passos acima mencionados foram cuidadosamente repetidos para todos os nanofluidos produzidos e analisados. Para além disso, é digno de nota que sempre que possível se tentaram reduzir os fatores de ruído do procedimento.

2.6. Metodologia da medição de viscosidade

Para a medição da viscosidade foi usado um viscosímetro rotacional da marca Brookfield, neste caso o modelo DV-III Ultra LV Rheometer. Este mede o momento necessário para rodar um elemento (veio) num fluido. Este veio é acionado por um motor elétrico através de uma mola calibrada; o grau da deflexão da mola é indicado por um display digital. Por utilizar uma transmissão de múltiplas velocidades e de diferentes tipos de veios medidores, podem ser estudadas viscosidades com largos intervalos de medida, o que comprova a versatilidade deste equipamento.

Para uma dada viscosidade, a viscosidade de arrasto, ou resistência ao escoamento, que é dada pelo grau em que a mola já não consegue defletir mais, é proporcional à velocidade de rotação do veio e está relacionada com o tamanho do veio e sua geometria. O arrasto irá então aumentar quando o tamanho e/ou velocidade do veio aumenta. Assim, para uma dada geometria do veio e velocidade, o aumento da viscosidade é indicado por um aumento da deflexão da mola. Para qualquer modelo de viscosímetro, o mínimo intervalo medido é obtido usando o veio mais largo a uma grande velocidade, enquanto que o máximo acontece quando o veio é mais estreito e a velocidade de rotação é menor. Medições efetuadas usando o mesmo veio a diferentes velocidades são usadas para detetar e avaliar as propriedades reológicas do fluido base.

O viscosímetro é composto por vários mecanismos de montagem, como é possível observar no esquema da figura 2.5, que ilustra os diferentes componentes do aparelho.

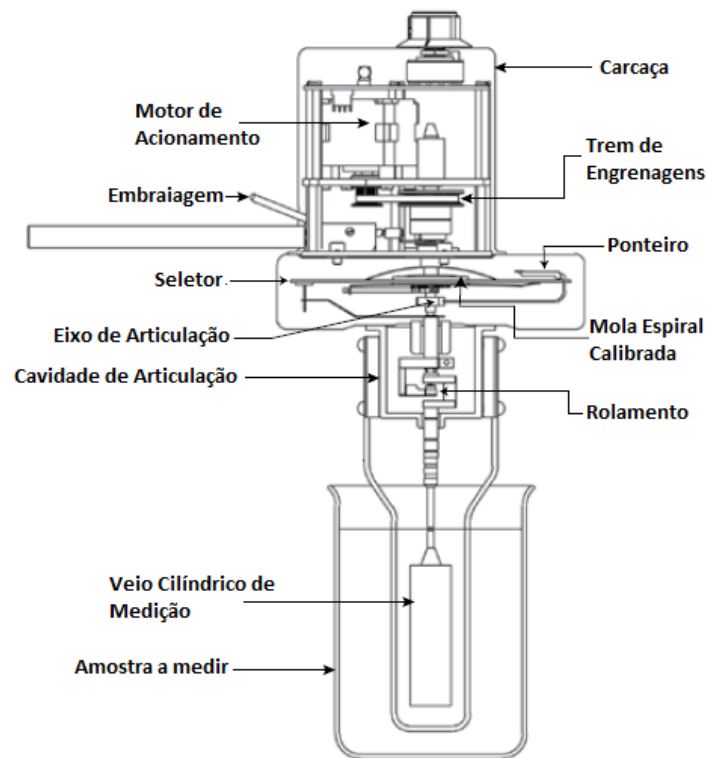


Figura 2.5: Esquema dos diferentes componentes do reômetro Brookfield DV-III Ultra LV Rheometer

O motor de acionamento de passo está localizado no topo do aparelho, na zona onde está alojada a placa de identificação. O viscosímetro principal contém uma mola de cobre-berílio calibrada, com uma extremidade acoplada ao eixo de articulação e a outra ligada diretamente ao disco. Este disco é comandado pelo eixo de acionamento do motor, que por sua vez guia o eixo de articulação através a mola. Nos modelos digitais, como é o caso do aparelho usado nesta investigação, a posição angular relativa do eixo de articulação é detetado por um *RVDT* (transdutor de deslocamento rotativo variável) e o seu valor é lido no display.

Por baixo da caixa principal está o copo onde vai ser depositado a amostra do fluido a medir. Nesta investigação usou-se um veio de medição do tipo cilíndrico, num aparelho digital e com controlo externo de temperatura a partir de um aparelho de banho térmico.

Os passos para a medição da viscosidade são descritos de seguida.

- Ligar a máquina e selecionar o display o modo de controlo de temperatura externo;
- Verificar se o reômetro está nivelado pelo líquido de medição do nível, situado acima do aparelho;

- Calibrar o aparelho, colocando todos os parâmetros a zero, com o auxílio do software de computador para o efeito *RHEOCALC32*;
- Montar o copo onde vai ser depositada a amostra a medir no viscosímetro, seguido dos 6,7 ml da amostra a analisar, do veio cilíndrico de medição e do anel de fixação;
- De seguida acoplar o eixo que faz rodar o veio de medição ao próprio;
- Por último, programar o tipo de medição no software, referindo as 7 temperaturas em que vão ser medidas, as taxas de corte a serem usadas (92,4, 132, 171,6, 211,2, 250,8, 290,4 e 330 s⁻¹), e quantas medições irão ser feitas para cada um dos parâmetros a medir.

Foi seguido este procedimento para todos os tipos de amostras em análise, numa medição que demora cerca de 18h a ser executada pelo reómetro Brookfield *DV-III Ultra LV Rheometer*.

2.7. Análise global de erros

Nas secções anteriores deste capítulo, foram apresentadas todas as metodologias de preparação dos nanofluidos, assim como a metodologia da medição das viscosidades. Nesta secção, irá ser feita uma análise pormenorizada a todos os erros experimentais que possam advir dessas metodologias.

Considerando a metodologia de preparação dos nanofluidos, foi usada a equação 2.1 para saber qual seria a massa de nanopartículas a ser medida. Nas medições volúmicas e mássicas dos fluidos base água destilada e etilenoglicol, e dos nanotubos de carbono de parede múltipla, respetivamente, existem erros que são possíveis de se cometer. De facto, ao ser medido o volume de fluido base numa pipeta, para depois ser colocado posteriormente numa proveta graduada, foi necessário ter em conta que estes materiais têm sempre um erro associado que tem um valor correspondente a metade da menor divisão da escala, o valor de qualquer aparelho analógico de medida, e que neste caso tem o valor de 0,05ml na pipeta, que é o instrumento de medição utilizado por excelência na preparação do nanofluido. Relativamente ao procedimento de medição de massa de nanotubos de carbono de parede múltipla, recorreu-se a uma balança de alta precisão, e sendo um aparelho digital, irá ter um erro de medição máximo correspondente à menor casa decimal do aparelho, neste caso 0,001g.

Na metodologia de medição da viscosidade, em que as amostras dos nanofluidos em estudo são colocadas no reómetro *Brookfield DV-III Ultra LV Rheometer* (como explicado na secção 2.6) também podem ocorrer erros que poderão afetar, de certa forma, a medição da viscosidade das

amostras. É o caso do controlo externo e independente da temperatura da amostra, onde é feita a estabilização da temperatura pelos banhos térmicos externos ao reómetro onde está a ser medida a viscosidade da amostra.

Relativamente à amostra a ser medida e à sua repetibilidade, existem algumas considerações a ser feitas no que diz respeito ao modo de como são recolhidos os dados e selecionados para análise. No procedimento experimental, são recolhidos dados para 6 nanofluidos diferentes, em que as diferenças entre eles consistem no tamanho e geometria dos nanotubos de carbono e nas diferentes concentrações de etilenoglicol no fluido base, para cinco concentrações diferentes de nanotubos de carbono em volume de solução e para sete temperaturas diferentes da amostra. Para cada temperatura foram considerados 7 valores de taxa de corte (92,40, 132,00, 171,60, 211,20, 250,80, 290,40 e 330,00 s⁻¹), como referido na secção 2.3, e para cada valor destes foram medidos em média 20 valores de viscosidade. Destes 20 valores medidos pelo reómetro, foi calculada a média para cada taxa de corte e para cada temperatura, de modo a obter-se para a análise um valor médio para cada taxa de corte, obtendo-se assim 7 valores por temperatura e, portanto, 49 valores para cada concentração volúmica de nanotubos de carbono. Seguidamente, foi verificada a repetibilidade e precisão da amostra, calculando o erro da viscosidade em relação ao valor médio de cada valor considerado para análise, tendo sido calculado o desvio padrão da amostra e com um grau de confiança de 95%, numa distribuição de *T-Student*, o erro da viscosidade medida pode ser dado pela expressão:

$$\Delta v = t_{,975} \times \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.2)$$

onde $t_{,975}$ é o valor de *T-student* tabelado tendo em conta o tamanho da amostra (tabela em anexo), N é o tamanho da amostra e σ é o desvio padrão da amostra, dado pela equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \times \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}, \quad (2.3)$$

onde \bar{v} corresponde ao valor médio da viscosidade da amostra. Os valores de Δv podem ser encontrados tabelados no anexo 7.2, juntamente com os valores médios de v calculados para cada nanofluido.

3. Resultados e Análise Paramétrica

3.1. Síntese do capítulo

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do desenho experimental usado para os vários tipos de nanofluidos em análise, de modo a medir-se a viscosidade, estabelecendo a sua relação com a temperatura, fluido base, tamanho e concentração das partículas, bem como diferentes taxas de corte. Dado o elevado número de dados experimentais obtidos, nesta secção estão expostas as análises estatísticas levadas a efeito por forma a identificar as variáveis detentoras de maior relevância. Os restantes dados são no entanto remetidos para o anexo 7.3, sob a forma de tabelas e figuras.

3.2. Análise paramétrica

Devido ao elevado número de dados experimentais obtidos, nesta secção serão apresentadas algumas das análises estatísticas efetuadas para os resultados experimentais que se apresentam na sua globalidade e em detalhe no anexo 7.3, sob a forma de tabelas e figuras.

Várias análises foram efetuadas de modo a identificar de que forma os fatores de controlo, referidos no capítulo anterior, produzem um efeito nos resultados medidos e como o mesmo pode ser quantificado. Para além disso, pretendeu-se ainda identificar a fiabilidade da globalidade do sistema de medida utilizado, estabelecendo dependências relativas e interações. Essa interação entre os fatores de controlo ocorre quando um dos fatores afeta os resultados dependendo de um outro fator ou fatores.

Deste modo, antes de proceder à análise dos resultados no que concerne à viscosidade, verificou-se numa primeira fase se os nanofluidos produzidos satisfaziam as condições de estabilidade anteriormente definidas, reduzindo, deste modo os fatores de ruído consideravelmente e relevando-se este como o parâmetro de erro cumulativo detentor de maior influência a repetibilidade experimental, neste tipo de experiência. Assim, os gráficos que serão apresentados de seguida contêm os valores médios calculados para cada taxa de corte e para cada temperatura, e têm um erro associado, que foi calculado como descrito no capítulo 2.7 e que está apresentado em tabelas no anexo 7.3 juntamente com os resultados médios de cada amostra.

3.2.1. Análise do efeito do fluido base na viscosidade

Começando pela análise do efeito do fluido base na viscosidade do nanofluido, foi possível observar, com base nos dados que estão dispostos no gráfico da figura 3.1, que um nanofluido de

nanotubos de carbono com diâmetro de 20 a 40 nm e comprimento de 10 a 30 μm , e com fluido base aquoso composto por 60% de etilenoglicol, apresenta uma viscosidade bastante superior à do nanofluido composto pelo mesmo tipo de nanopartículas mas com fluido base aquoso composto por 30% de etilenoglicol. Desta análise concluiu-se que os nanofluidos mais viscosos são compostos por um fluido base com uma maior concentração de etilenoglicol, e essa diferença é ainda mais notória para temperaturas mais baixas, sendo que a diferença de viscosidades entre os dois nanofluidos diminuí com o aumento de temperatura.

Como foi referido na secção 1.3.4.4, alguns investigadores chegaram a estas mesmas conclusões, estabelecendo que quanto maior a concentração de etilenoglicol, maior a viscosidade do nanofluido, como é o caso de Chen *et al.*, 2009 e Wang, Xu e S. Choi, 1999.

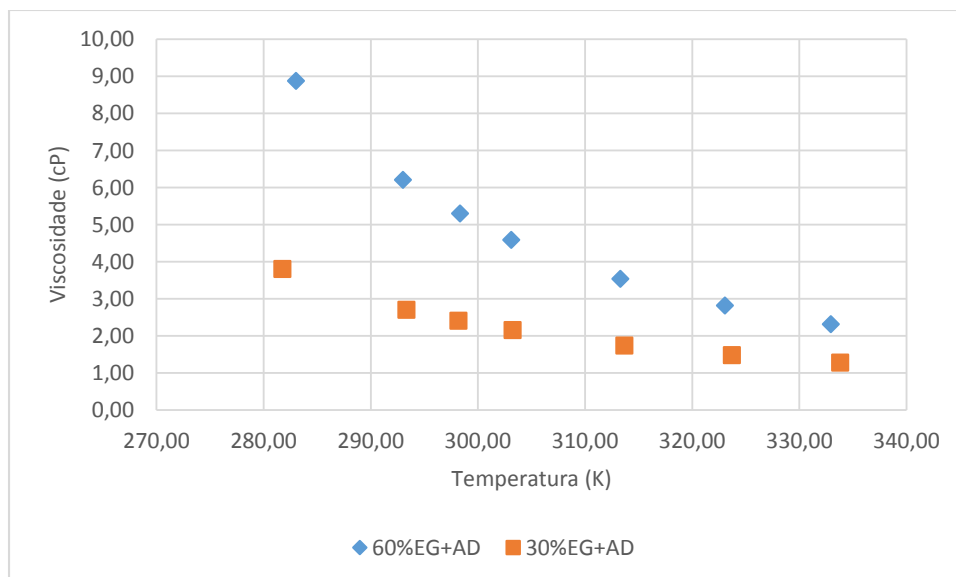


Figura 3.1: Gráfico comparativo da viscosidade de dois tipos de fluidos base diferentes

Relativamente ao fluido base, foram também medidas as viscosidades de modo a poderem comparar-se os diferentes fluidos. Assim, como se pode visualizar na figura 3.2, onde se apresenta um gráfico com as curvas teóricas para diferentes tipos de fluido base constituídos por etilenoglicol e água destilada, a água destilada é o fluido menos viscoso dos analisados, qualquer que seja a temperatura a que seja medida, no intervalo considerado. No extremo oposto está o etilenoglicol, que é o fluido mais viscoso em análise. Neste caso, este fluido tem um comportamento reológico de grande dependência relativamente à temperatura, pois com o aumento da temperatura em 70K o fluido diminuiu cerca de 90% da sua viscosidade. Pelo meio

ficam os fluidos compostos por etilenoglicol e água, sendo o mais viscoso aquele que tem maior percentagem de etilenoglicol na sua composição, como seria expectável.

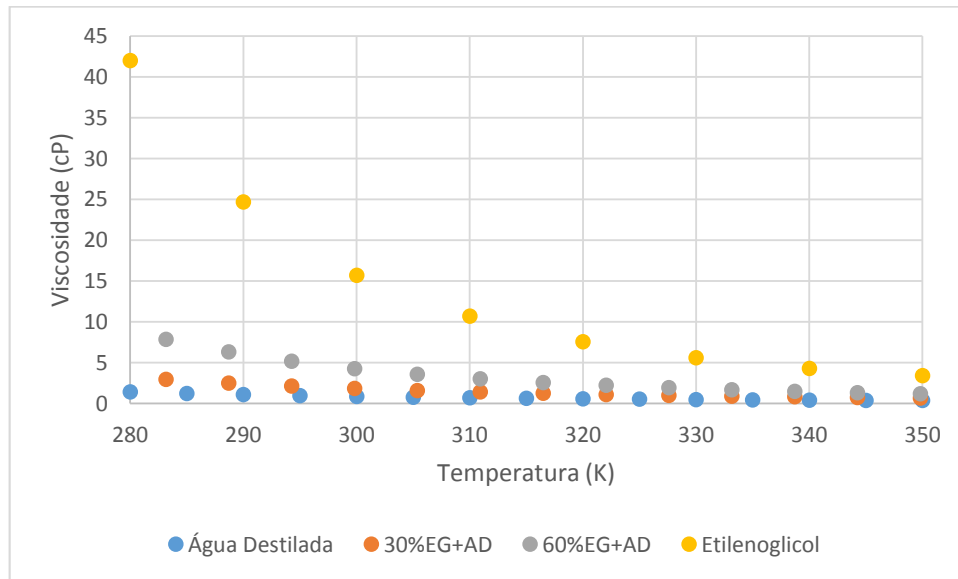


Figura 3.2 Gráfico das curvas teóricas de ASHRAE para 4 tipos de fluidos base constituintes de nanofluidos

3.2.2. Análise do efeito do tipo de partículas (razão de aspeto) na viscosidade de um nanofluido

Como foi observado na secção 1.3.4.2, vários investigadores relacionaram o tamanho das partículas e sua razão de aspeto com a viscosidade dos nanofluidos. Nesta dissertação também se procedeu ao mesmo tipo de análise. Assim, observando o gráfico da figura 3.3 foi possível visualizar que, para uma concentração de 0,25% em volume da solução para os dois tipos de nanofluidos, a curva de comportamento da viscosidade com a temperatura nas duas amostras é semelhante, ainda que no nanofluido com partículas de comprimento de 1 a 2 μm o valor de viscosidade seja um pouco mais elevado a baixas temperaturas, e que se vai esbatendo com o aumento da temperatura até aos 333K (60°C).

Modelos Reológicos de Nanofluidos

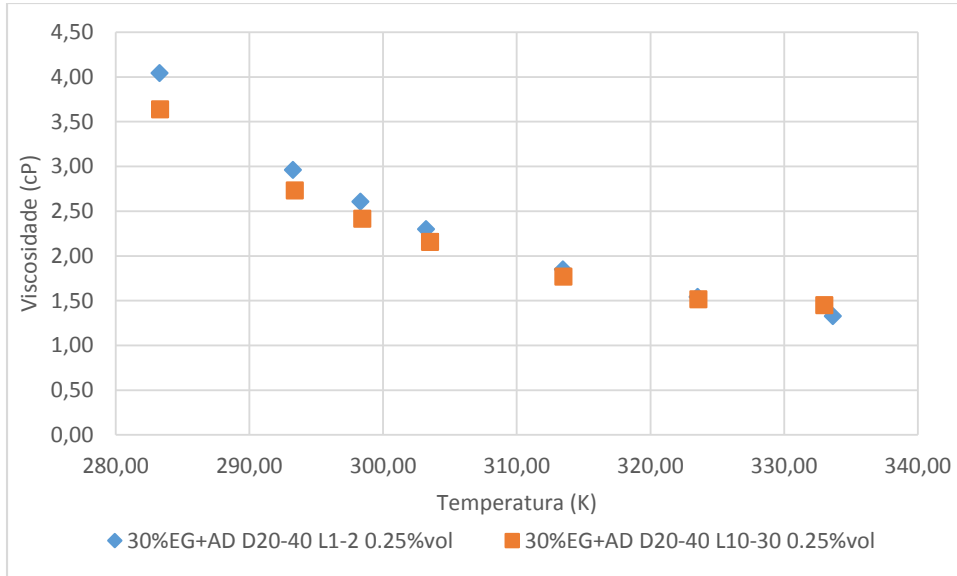


Figura 3.3: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base (30%EG+AD) mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 0.25%vol

O comportamento anterior também é válido para concentrações mais elevadas, como é o caso dos gráficos seguintes (figuras 3.4, 3.5 e 3.6), para concentrações de 0,75% e 1,5% de nanopartículas em volume de solução.

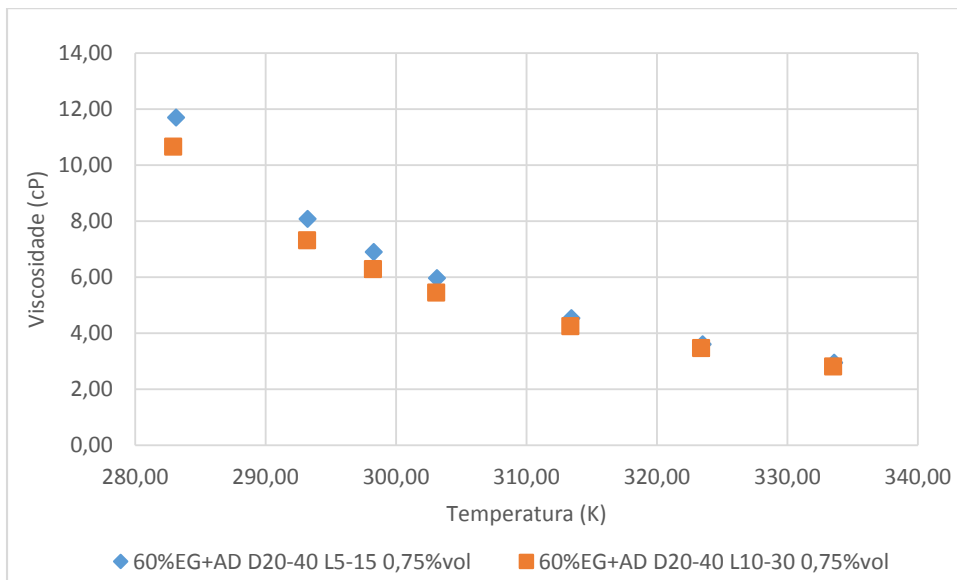


Figura 3.4: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 0.75%vol

Modelos Reológicos de Nanofluidos

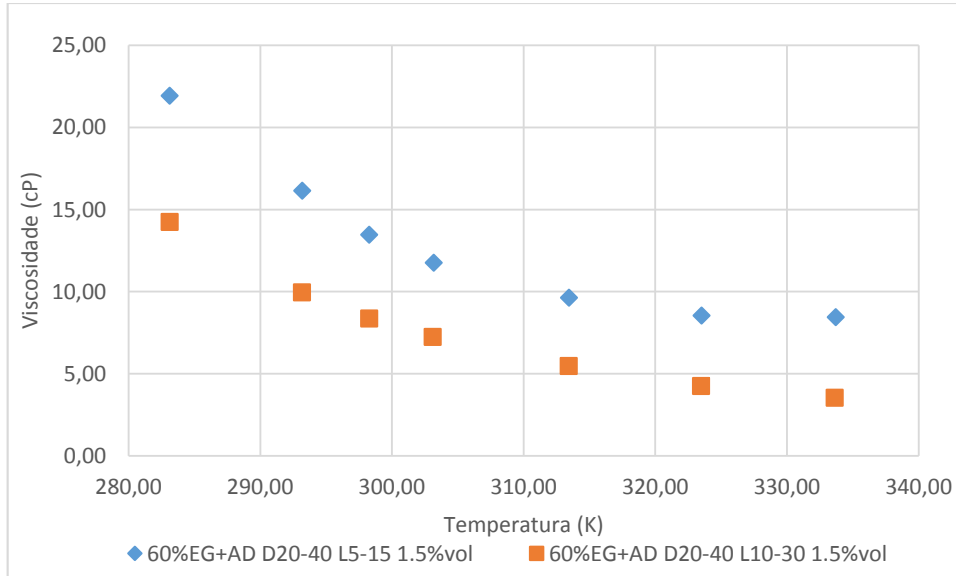


Figura 3.5: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 1.5%vol

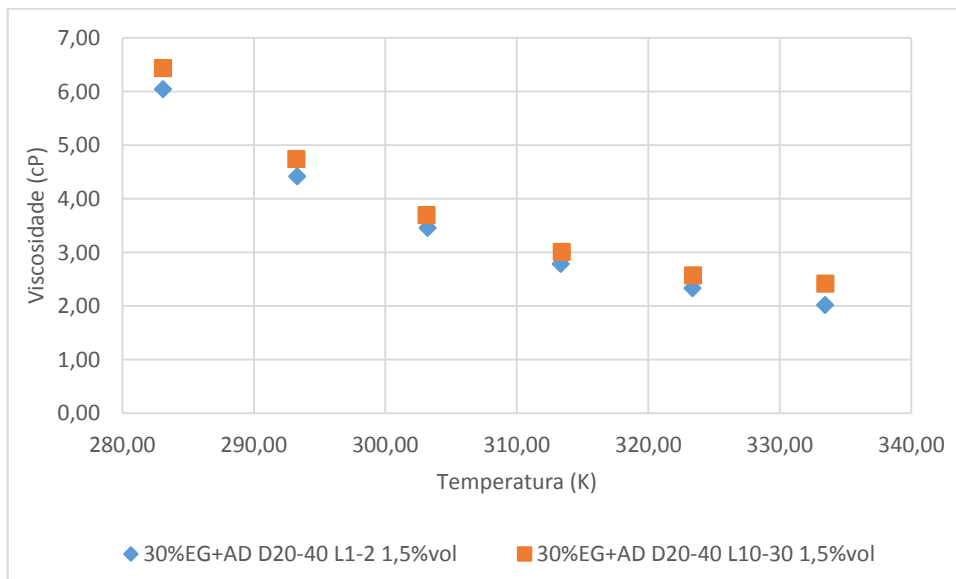


Figura 3.6: Gráfico comparativo da viscosidade entre dois nanofluidos com o mesmo fluido base mas com nanopartículas de comprimento diferente a uma concentração de 1.5%vol

Comportamento semelhante aos gráficos anteriores têm as amostras de dados presentes no gráfico da figura 3.7, onde se pode ver também que ao analisar dimensões de partículas diferentes relativamente ao diâmetro e comprimento e não apenas a esta última dimensão, como foi feito proposto na figura anterior, a viscosidade aumenta com o aumento do diâmetro e

diminuição da razão de aspeto, ainda que não sejam discrepâncias muito grandes relativamente às restantes amostras em estudo.

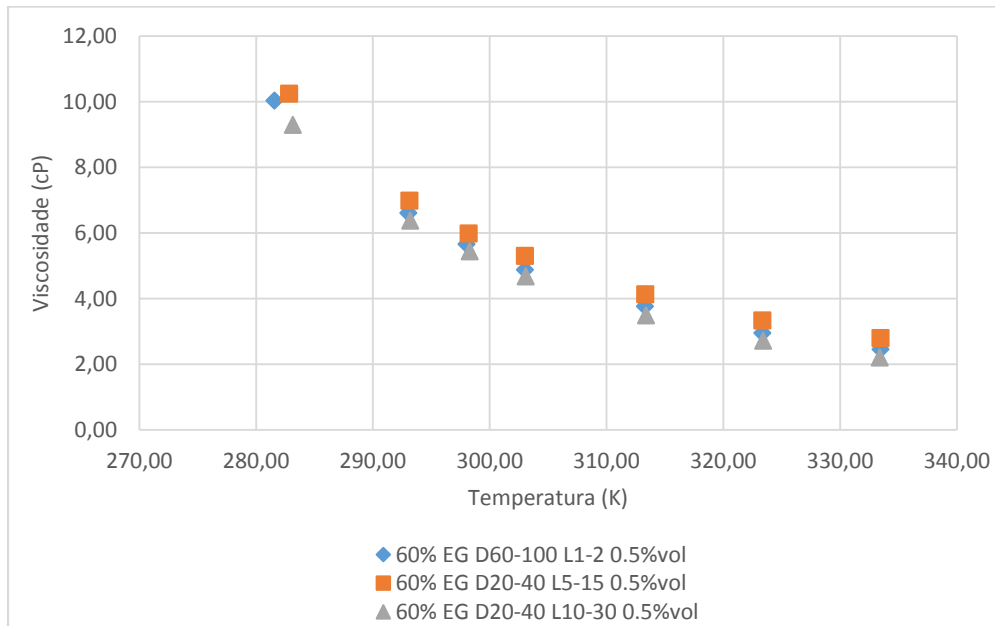


Figura 3.7: Gráfico comparativo da viscosidade entre três nanofluidos com o mesmo fluido base de 60%EG+DW mas com nanopartículas de dimensões diferentes a uma concentração de 0.25%vol

Com base nesse comportamento, analisou-se igualmente o efeito da variação de diâmetro das partículas, para se conseguir perceber qual a variação da viscosidade com a temperatura, mantendo o comprimento das nanopartículas constante. Assim, como se pode observar pelo gráfico da figura 3.8, a amostra de nanofluidos cujo diâmetro é maior tem uma menor viscosidade, ainda que a diferença entre as viscosidades não seja muito significativa.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

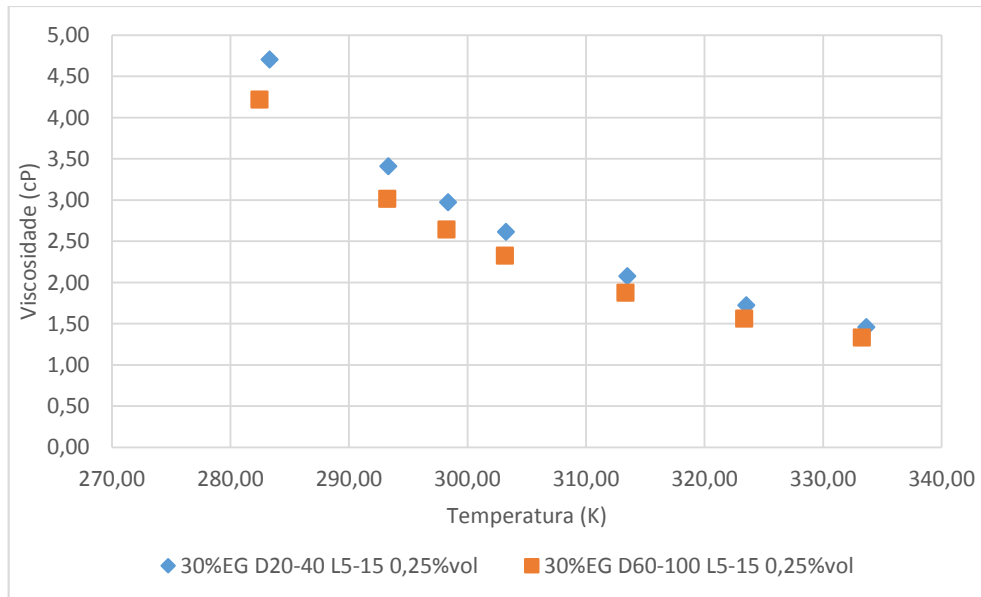


Figura 3.8: Gráfico comparativo da viscosidade de dois nanofluidos constituídos pelo mesmo fluido base (30%EG+AD) e pela mesma concentração de nanotubos de carbono (0.25%vol) e com nanotubos de carbono de igual comprimento (L5-15) mas diferentes diâmetros

Comparando estes últimos resultados da figura 3.8 com as teorias propostas na revisão bibliográfica, mais concretamente na secção 1.3.4.2., é possível encontrar uma relação com o modelo de Lu e Fan (2008), onde consideraram que a viscosidade diminui com o aumento do diâmetro das nanopartículas, estando igualmente de acordo com o modelo de Anoop, Sundararajan e Das (2009) e com o modelo de Pastoriza-Gallego *et al.* (2011).

No entanto, como se pôde observar na figura 3.6, a viscosidade aumenta com o aumento do comprimento dos nanotubos de carbono, para o mesmo diâmetro, o que poderá estar de acordo com a teoria de He *et al.* (2007), que consideraram que a viscosidade de corte aumenta com o aumento do tamanho da partícula, ainda que este modelo se refira a partículas de geometria esférica, e portanto esta conclusão se refira ao tamanho global da partícula e não apenas ao comprimento da mesma no caso de a geometria ser tubular. Contudo, os dados experimentais estão de acordo com a investigação de Timofeeva, Routbort e Singh (2009), que concluíram que a viscosidade tem uma forte dependência da forma da partícula, mostrando que partículas longas como placas ou cilindros conferem maior viscosidade, para a mesma fração de volume.

3.2.3. Análise da influência da concentração de nanopartículas de MWCNT na viscosidade do nanofluido

Em linha com as análises que foram feitas anteriormente, foi analisado também o efeito da concentração das nanopartículas na viscosidade, como é possível observar nos dados dispostos nos gráficos das figuras seguintes, 3.9 a 3.14.

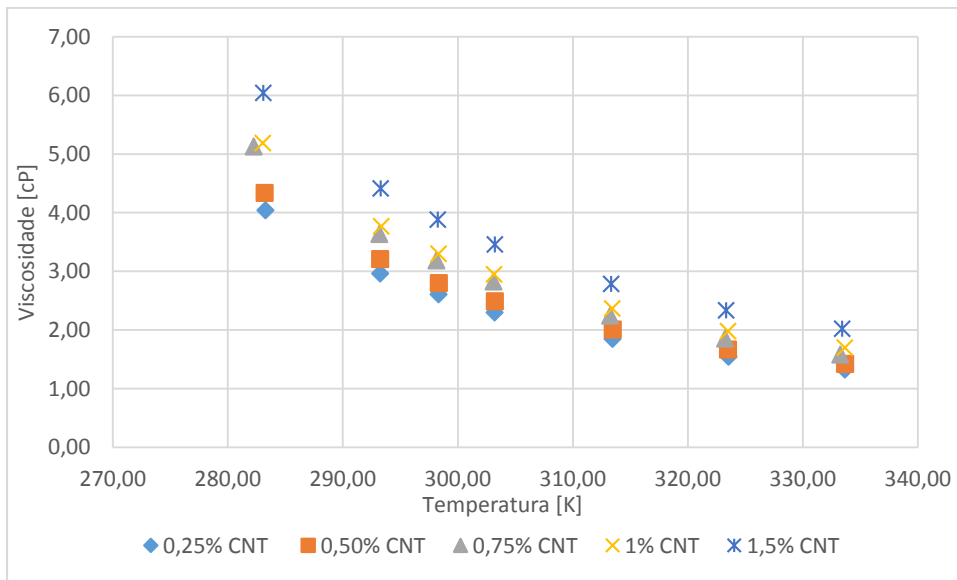


Figura 3.9: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas

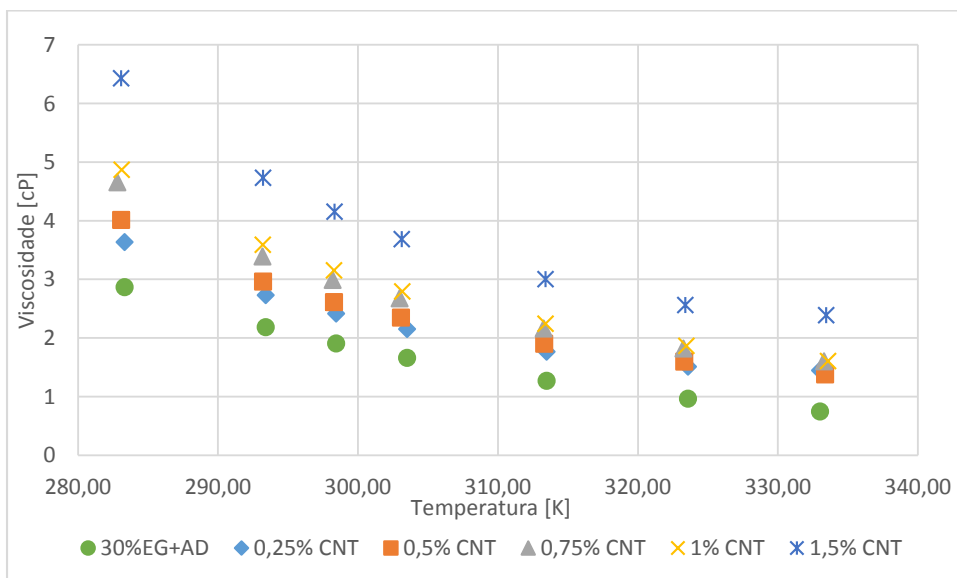


Figura 3.10: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L10-30 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas

Modelos Reológicos de Nanofluidos

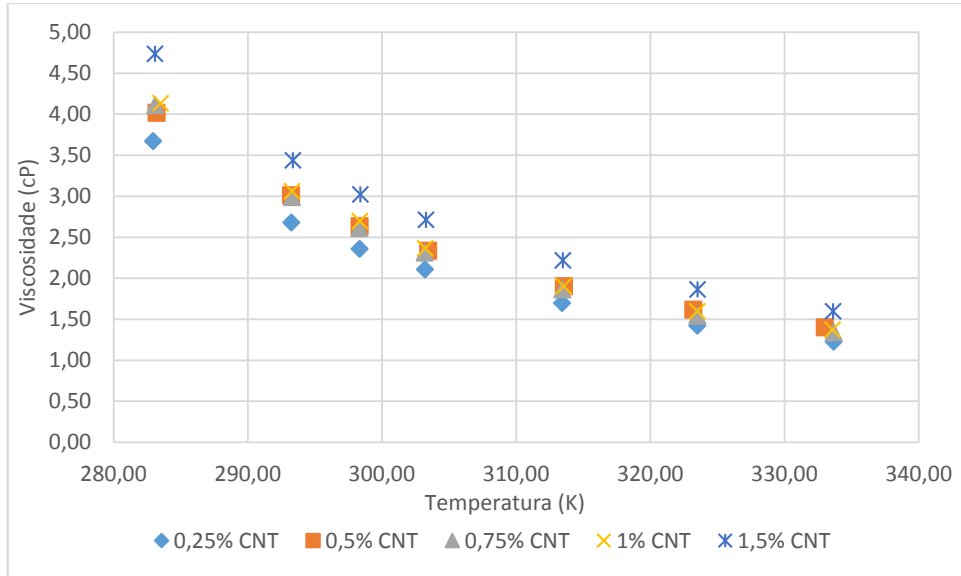


Figura 3.11: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 30% EG a várias temperaturas

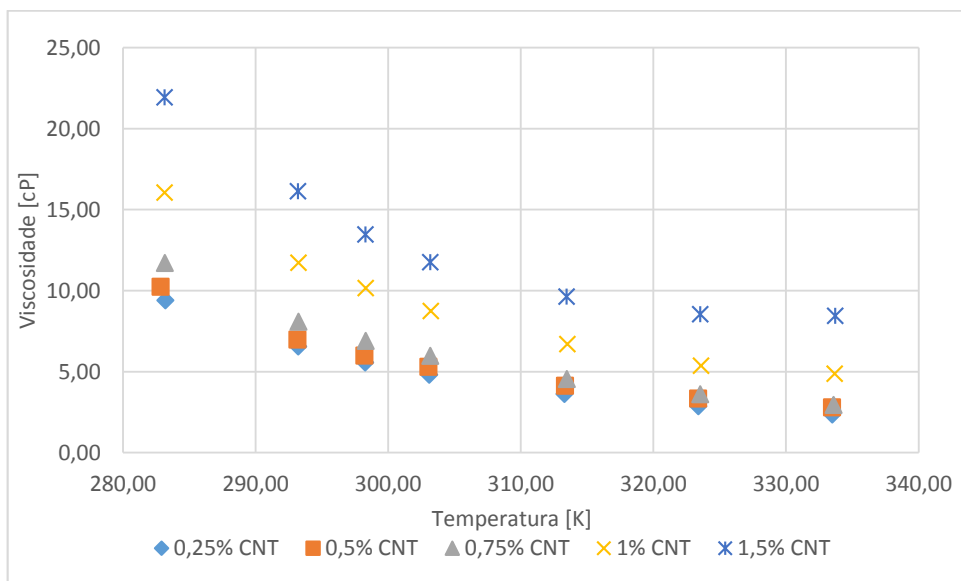


Figura 3.12: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L5-15 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas

Modelos Reológicos de Nanofluidos

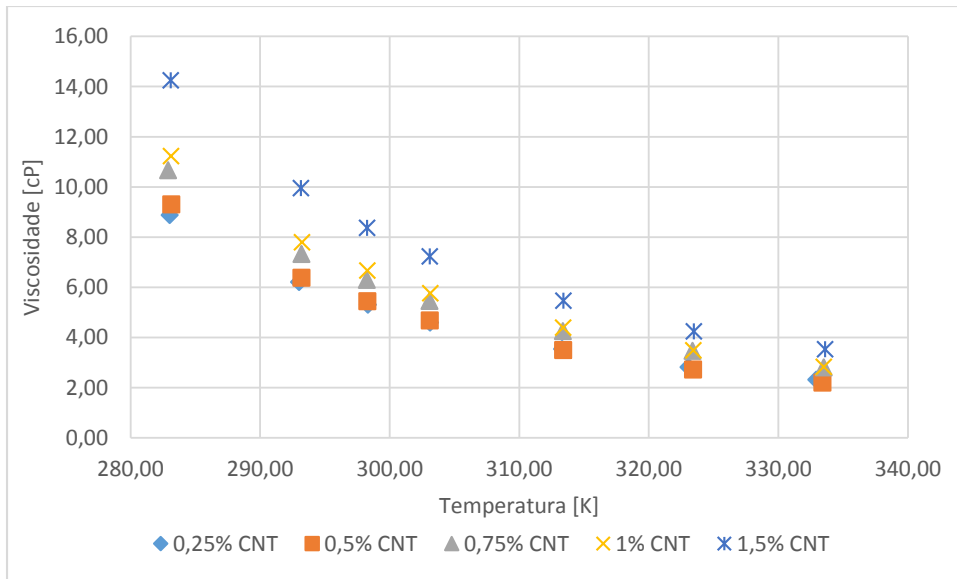


Figura 3.13: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D20-40 e L10-30 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas

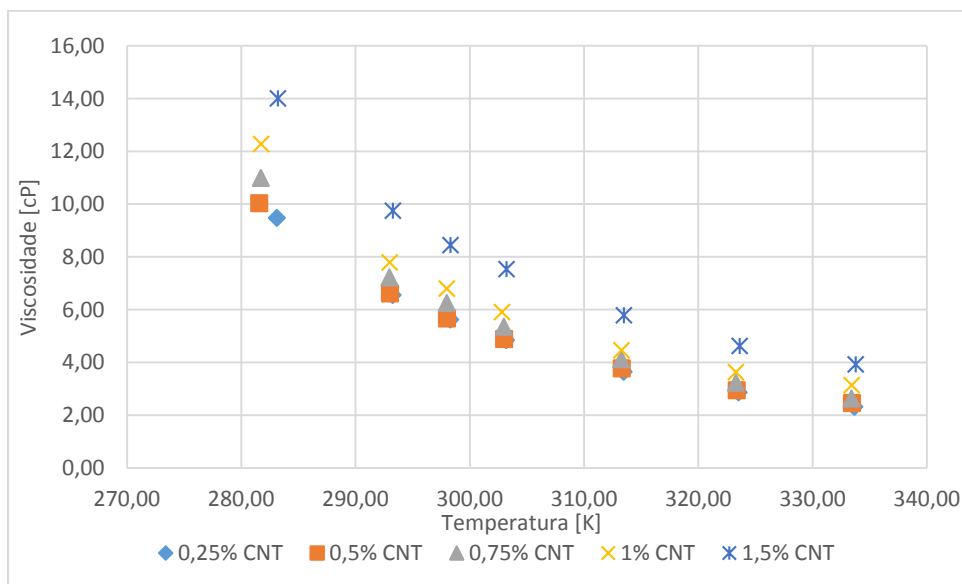


Figura 3.14: Gráfico comparativo da influência da concentração de nanotubos de carbono de D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 60% EG a várias temperaturas

Com base na observação de todos estes gráficos, é possível perceber que todas as partículas têm, no geral, comportamentos semelhantes. Assim, é possível concluir que a viscosidade dos nanofluidos aumenta com o aumento da concentração dos nanotubos de carbono na solução base que os constitui, qualquer que seja a concentração de etilenoglicol usada. Ainda assim, as maiores diferenças de viscosidade são notadas para temperaturas mais baixas, sendo que com o

aumento de temperatura essas diferenças se desvanecem, e os valores da viscosidade aproximam-se entre si, principalmente para as concentrações mais baixas de partículas.

Como se pôde verificar na secção 1.3.4.3., todos os investigadores provaram que o aumento da concentração volúmica de nanotubos de carbono na solução de fluido base que constitui o nanofluido provoca um aumento da viscosidade. Entre estes investigadores puderam-se destacar Das, Putra e Roetzel, em 2002 e 2003 e Prasher *et al.*, 2006, que o provaram pelo estudo de nanofluidos constituídos por Al_2O_3 em água e por Chevalier, Tillement e Ayela, 2007, que tiveram a mesma conclusão ao estudar um nanofluido de SiO_2 em etanol.

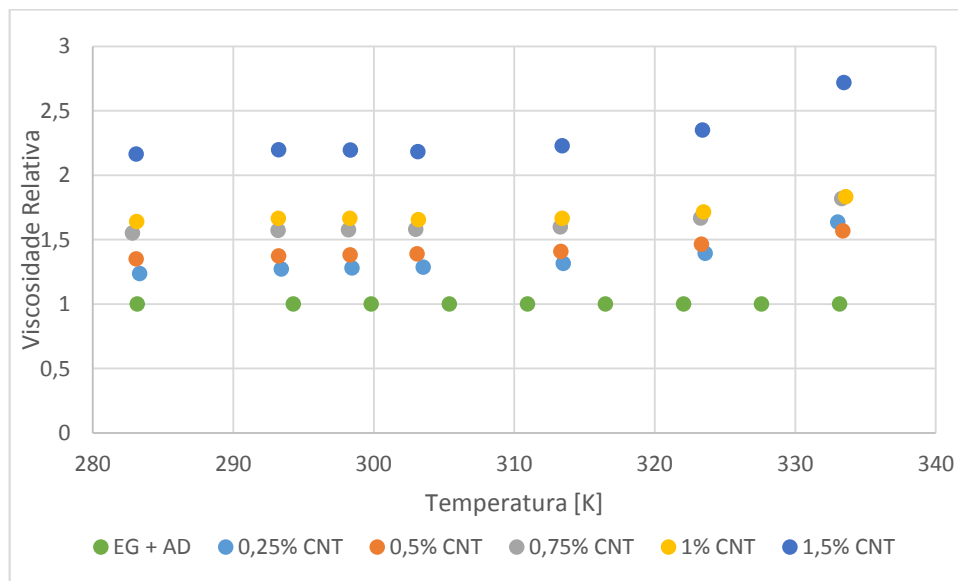


Figura 3.15: Gráfico da relação entre a viscosidade relativa com a concentração de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 numa solução aquosa com 30% de etilenoglicol, para diferentes temperaturas.

A viscosidade relativa é a razão entre a viscosidade do nanofluido a medir e a viscosidade do fluido base que lhe dá origem. Observando o gráfico da figura 3.15 que mostra a viscosidade relativa dependente da temperatura, é possível observar melhor o efeito que esta última tem na viscosidade de um nanofluido. De facto, o primeiro fator mantém-se relativamente constante até à temperatura de 323K (50°C), isto é, os nanofluidos apresentam um comportamento semelhante ao do fluido base, pelo que acima dessa temperatura se pôde observar um acréscimo de viscosidade relativamente ao fluido base constituinte do nanofluido. Esta conclusão é partilhada por Chen *et al.*, 2008, que ao mostrar o efeito da temperatura de um nanofluido de MWCNTs em água destilada, verificou que a viscosidade relativa aumenta significativamente a partir de uma temperatura de 55°C.

3.2.4. Análise da influência da taxa de corte na viscosidade

Na figura 3.16, que contém o gráfico da relação da taxa de corte com a viscosidade, foi possível constatar que de um modo geral, os nanofluidos mantêm a sua viscosidade relativamente constante com o aumento da taxa de corte, quando têm na sua composição pequenas composições de nanopartículas, como por exemplo, 0,25%vol, como está representado na figura 3.16.

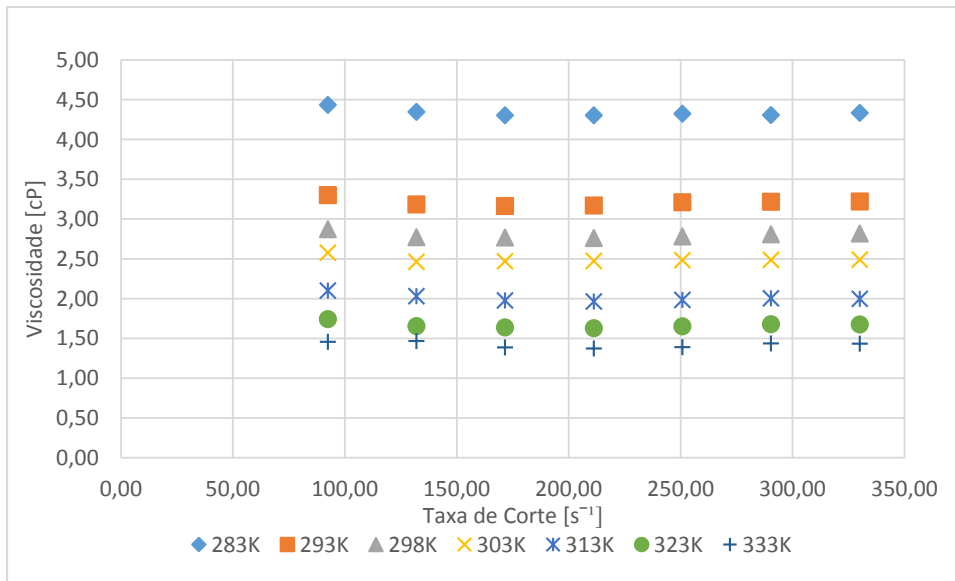


Figura 3.16: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0,25%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas.

Para concentrações médias e altas de nanopartículas no fluido base, a situação mantém-se semelhante à observada no gráfico anterior, como se pode observar nos gráficos seguintes.

Modelos Reológicos de Nanofluidos



Figura 3.17: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0.75%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas.

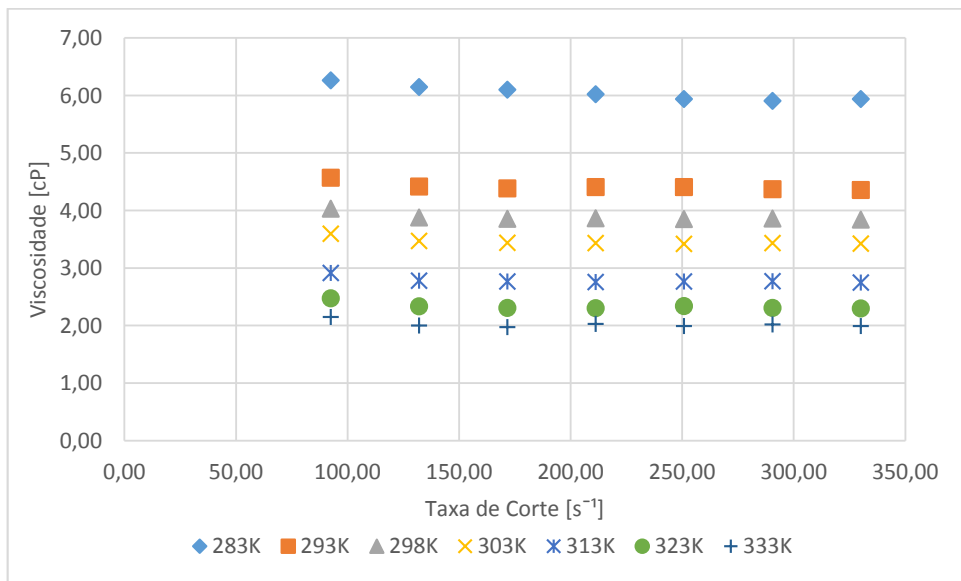


Figura 3.18: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 1.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D20-40 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas.

Observando agora as próximas figuras 3.19 e 3.20, correspondentes à mesma análise efetuada anteriormente, mas para outro tipo de nanofluido com nanotubos de diâmetro de 60 a 100 nm e comprimento de 1 a 2 µm e um fluido base composto por 60% de etilenoglicol, pôde-se verificar que para uma menor concentração de nanopartículas (0,25%vol) o nanofluido se comporta como os analisados anteriormente. No entanto, para maiores concentrações de partículas, neste caso,

Modelos Reológicos de Nanofluidos

de 1,5%vol, é possível visualizar um comportamento de ligeira queda, isto é, para maiores taxas de corte houve um decréscimo muito ligeiro da viscosidade dos nanofluidos.

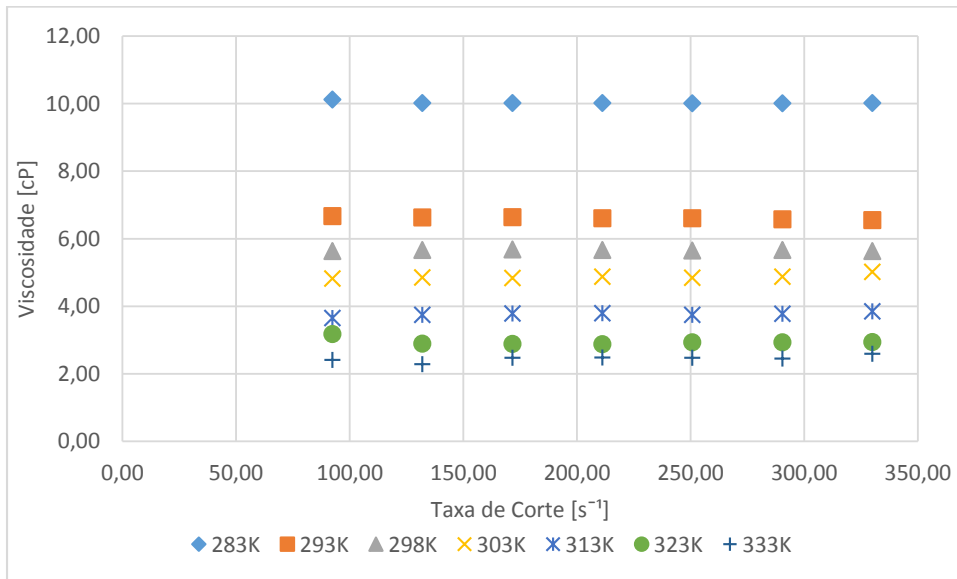


Figura 3.19: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 0.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 60% de etilenoglicol a várias temperaturas.

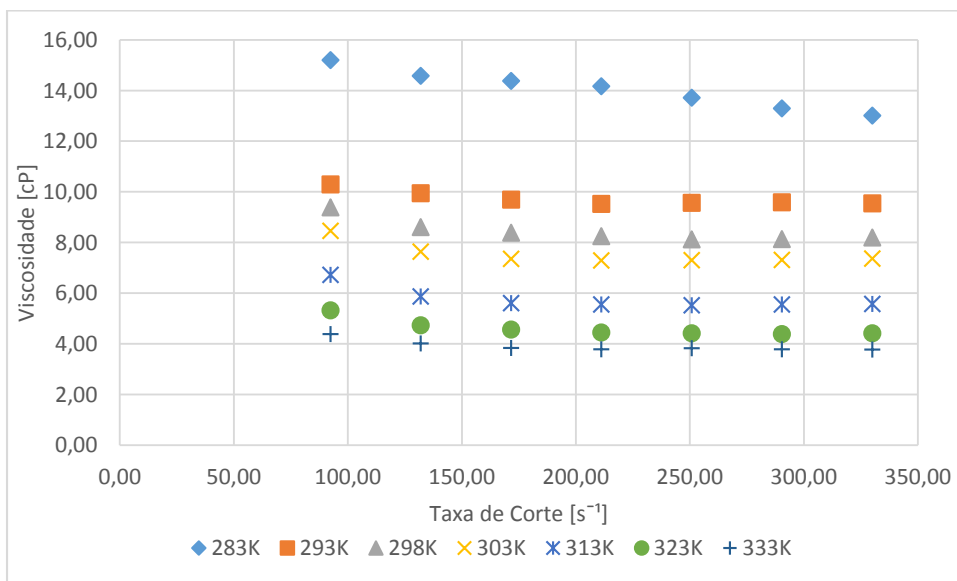


Figura 3.20: Gráfico da influência da taxa de corte na viscosidade de um nanofluido constituído por 1.5%vol nanotubos de carbono de dimensão D60-100 e L1-2 numa solução aquosa de 30% de etilenoglicol a várias temperaturas.

Comparando os resultados obtidos com os modelos estudados no capítulo 1 é possível concluir que estes fluidos se comportam como fluidos Newtonianos a baixas concentrações de partículas,

conclusão partilhada por Chen *et al.*, 2011. Mais ainda, têm o comportamento de um fluido não newtoniano do tipo pseudoplástico quando as nanopartículas estão dispersas numa concentração mais elevada no nanofluido em estudo, como foi concluído por Ko *et al.*, 2007, ainda que essa variação seja muito ligeira.

3.3. Discussão dos resultados

Baseado na análise pormenorizada efetuada aos resultados provenientes das medições empíricas da viscosidade dos 6 tipos de nanofluidos em estudo, puderam tirar-se várias ilações que irão ser o ponto de partida para o estudo que está descrito no próximo capítulo.

Em primeiro lugar, e observando o comportamento dos nanofluidos pelos gráficos ao longo deste capítulo, pôde-se constatar que os principais fatores que mais fazem variar a viscosidade destes fluidos são a viscosidade do fluido base constituinte, a concentração de nanopartículas na dispersão e a temperatura. Em relação ao primeiro fator, pôde-se concluir, pela análise de diferentes concentrações de etilenoglicol na solução aquosa, que quanto mais viscoso o fluido base, mais viscoso será o nanofluido, como é lógico, assim como é lógico que quanto maior for a concentração de nanotubos de carbono num nanofluido, maior a viscosidade, como se pode comprovar ao observar os gráficos das figuras 3.9 a 3.15. Também analisando essas figuras se pôde concluir que quanto maior a temperatura, menor a viscosidade, pois com o aumento da temperatura a energia cinética média das partículas e do próprio fluido irá aumentar, pelo que as forças intermoleculares diminuem e o fluido escoia mais facilmente. É ainda interessante verificar que, observando o gráfico da figura 3.15 a viscosidade relativa tem um aumento brusco a partir dos 333K (60°C), o que poderá dever-se ao facto de a partir dos 50°C a estabilidade do coloide ser posta em causa devido às elevadas temperaturas a que o fluido está sujeito, provocando o desequilíbrio entre fases. Não foram feitas referências à variação da viscosidade devido à razão de aspeto uma vez que, apesar de as análises revelarem uma variação de viscosidade com o tamanho da partícula, isto é, com o aumento do diâmetro da partícula a viscosidade do nanofluido tem tendência a diminuir, e o inverso acontece quando há um aumento do comprimento, no entanto esta variação foi bastante ténue.

Relativamente à taxa de corte e ao comportamento reológico dos nanofluidos analisados, pôde-se verificar que estes fluidos têm na maioria dos casos o comportamento típico de um fluido Newtoniano, onde a viscosidade se mantém constante com a variação da taxa de corte. No

entanto, para altas concentrações de nanopartículas, mais concretamente para 1,5%vol de concentração de nanotubos de carbono de parede múltipla, verificou-se que houve um ligeiro decréscimo da viscosidade com o aumento da taxa de corte, comportamento esse que é típico de um fluido não-Newtoniano, nomeadamente de um fluido pseudoplástico.

4. Modelação do comportamento reológico dos Nanofluidos

4.1. Síntese do capítulo

Neste capítulo, irão ser apresentadas as relações entre os modelos reológicos teóricos referidos e descritos na revisão bibliográfica (na secção 1.3) e os resultados experimentais obtidos segundo os procedimentos que estão explicitados no capítulo 2 e apresentados e analisados no capítulo 3. Posteriormente, será efetuada uma análise comparativa de modo a perceber qual o modelo que consegue descrever o comportamento reológico de todos os tipos de nanofluidos testados com nanotubos de carbono de diferentes dimensões e diferentes concentrações em fluidos base diferentes, de modo a que o erro associado a essas comparações seja o menor possível. Finalmente, será selecionado o modelo existente que, globalmente, melhor permite modelar o comportamento reológico dos nanofluidos.

4.2. Análise comparativa dos modelos teóricos e dos dados experimentais

Analisaram-se os principais modelos teóricos especificados no capítulo 1, e tendo em linha de conta que estes não foram desenvolvidos para nanofluidos contendo na sua composição nanotubos de carbono de parede múltipla, foi efetuado um estudo com os dados da temperatura, concentração de nanopartículas no fluido e viscosidade do fluido base, composto por diferentes concentrações de água e etilenoglicol, no sentido de se verificar se os resultados possíveis de ser obtidos por estes modelos estariam próximos dos dados obtidos experimentalmente.

Como já foi possível verificar no capítulo anterior, pode-se constatar com os dados experimentais, que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Esta conclusão é partilhada para todos os modelos teóricos testados, assim como é possível verificar um outro comportamento importante, que é o facto de a viscosidade aumentar com a concentração de nanopartículas e de se manter relativamente constante (salvo exceções, nomeadamente no que diz respeito a concentrações mais elevadas) seja qual for a taxa de corte.

Passando agora à análise comparativa dos modelos teóricos com os resultados obtidos pelas medições efetuadas, é notório observar que existem modelos que não se aproximam tanto do valor experimental quanto outros. Para a concentração de 0,25% de nanotubos de carbono em volume de solução, e com nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2, é possível verificar, na figura 4.1, que os modelos mais próximos são o de Tseng e Lin (2003), modelo característico de nanofluidos constituídos por um fluido base aquoso e partículas esféricas de TiO_2 (equação 1.26),

o de Nguyen *et al.*(b) (2007), referente a um nanofluido constituído por partículas de *CuO* em água (equação 1.30) e o de Yiamsawas *et al.* (2013), modelo que correlaciona tanto a temperatura como a concentração de partículas de Al_2O_3 suspensas numa mistura de etilenoglicol e água destilada, representado pela equação 1.47. Para estes modelos teóricos, os desvios existentes relativamente aos dados experimentais apresentados no capítulo 3 são inferiores a 20%, para praticamente todas as temperaturas, como é possível observar no gráfico da figura 4.1.

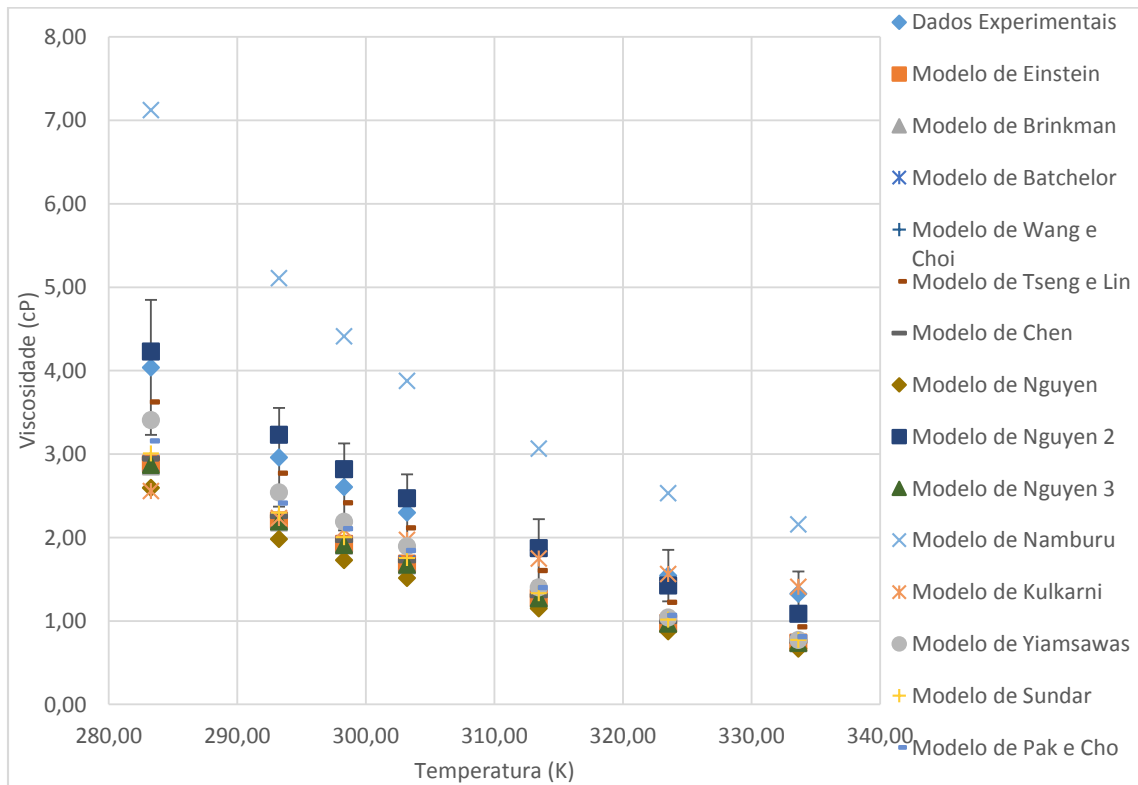


Figura 4.1: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 0,25%vol.

Para uma concentração de 0,75%vol de nanotubos de carbono, o comportamento da maioria dos modelos mantém-se semelhante ao da concentração mais baixa, embora haja um aumento natural da viscosidade devido à maior concentração de partículas no fluido em estudo. Na figura 4.2, que representa a relação entre a viscosidade e a temperatura para os modelos teóricos estudados e para os dados experimentais, é possível constatar que os modelos que mais se aproximam dos valores experimentais medidos são os mesmos que anteriormente – Tseng e Lin (2003), Nguyen *et al.*(b) (2007) e Yiamsawas *et al.* (2013) – embora com desvios relativos um pouco maiores, mas ainda assim abaixo dos 20%.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

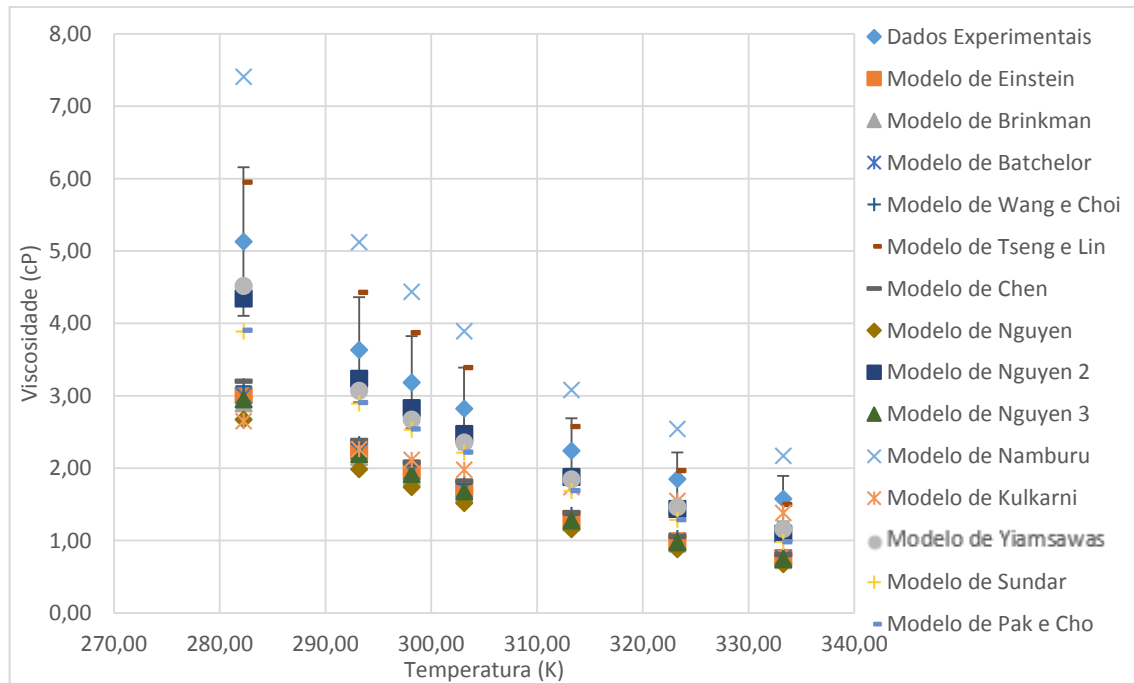


Figura 4.2: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 0,75%vol.

Para concentrações mais elevadas de nanopartículas, neste caso de 1,5%vol, as constatações que podem ser retiradas da observação dos gráficos, já vão ser diferentes. De facto, ao observar a figura 4.3 é possível verificar que os modelos teóricos cujos valores estão mais próximos dos valores teóricos são os modelos de Namburu *et al.* (2007), que se baseia num nanofluido constituído por óxido de cobre (equação 1.39), de Yiamsawas *et al.* (2013), de Syam Sundar *et al.* (2014), que foi criado tendo em vista o estudo reológico de um nanofluido composto por Al_2O_3 numa mistura de etilenoglicol e água destilada, e pelo modelo de Pak e Cho (1998), dado pela equação 1.34.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

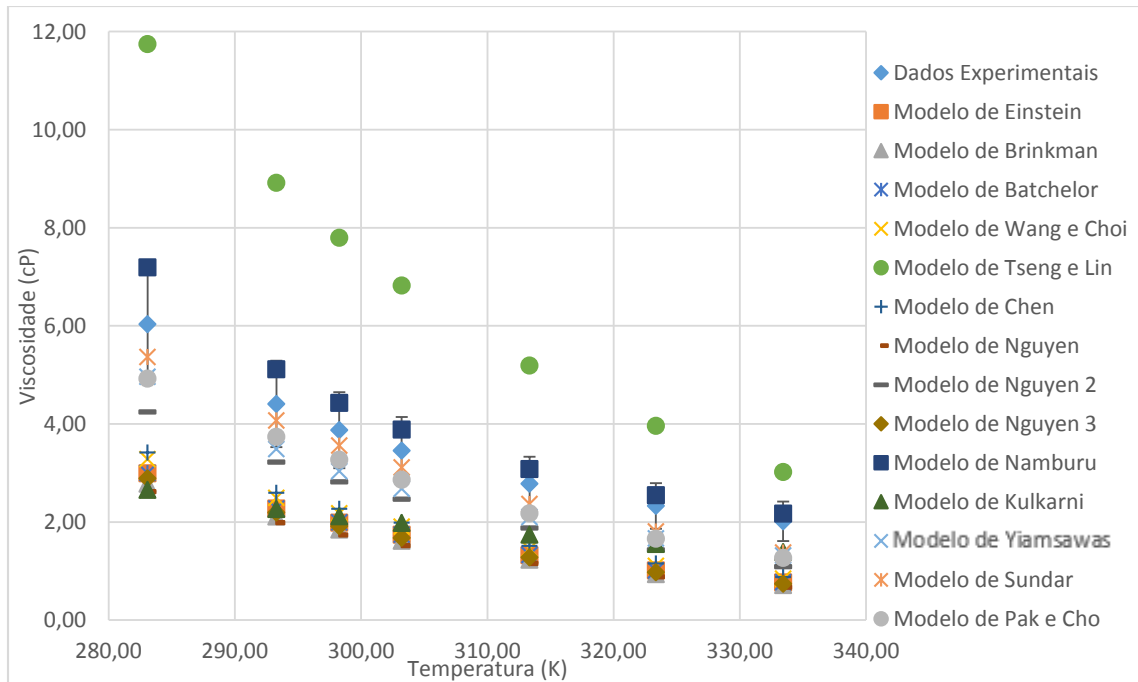


Figura 4.3: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 30% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D20-40 L1-2 a uma concentração de 1,5%vol.

Estes dois últimos modelos também se aproximaram dos dados experimentais dos dados anteriores, assim como das restantes partículas estudadas para fluidos base semelhantes ao deste tipo de nanofluido em estudo, isto é, para um fluido base de 30% de concentração de etilenoglicol.

Para o caso do fluido base composto por 60% de etilenoglicol em água destilada, a viscosidade do nanofluido será sempre superior em virtude da maior viscosidade do etilenoglicol, presente no fluido base, e consequentemente no nanofluido numa concentração mais elevada.

Considerando agora uma nanopartícula com razão de aspeto diferente, de dimensão D60-100 L1-2, como está representado na figura 4.4 a uma concentração de 0,25% de volume, pode-se constatar que os modelos teóricos mais próximos dos dados experimentais medidos são o modelo de Einstein, que é representado pela equação 1.15, o de Wang, Xu e S. Choi (1999), modelo criado para partículas de Al_2O_3 e CuO , que é dado pela equação 1.25, o modelo de Tseng e Lin (2003), de Chen *et al.*(2007), dado pela equação 1.28 e que modela a viscosidade de um nanofluido composto por um fluido base de etilenoglicol e nanopartículas de TiO_2 , pelo modelo de Nguyen *et al.*(c) (2007), referente a um nanofluido constituído por partículas de CuO em água (equação

1.31) e pelos modelos de Yiamsawas *et al.* (2013), Syam Sundar *et al.* (2014) e Pak e Cho (1998), estes últimos referidos nas análises aos gráficos anteriores.

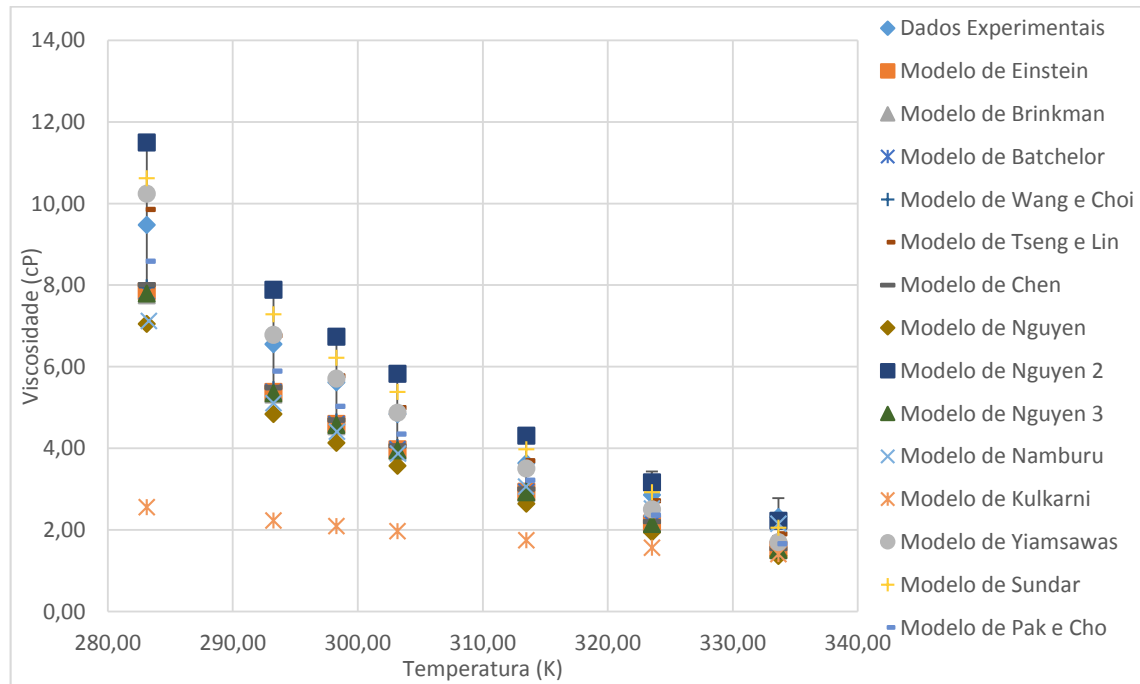


Figura 4.4: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 0,25%vol.

Para um aumento de concentração para 0,75%vol de nanotubos de carbono do mesmo tipo e num fluido base de igual composição, o cenário altera-se um pouco. De facto, ao analisar o gráfico da figura 4.5 é possível reparar que os modelos que se aproximam mais dos valores obtidos pela medição da viscosidade (cujo método está descrito no capítulo 2) são os de Nguyen *et al.*(b) (2007), Yiamsawas *et al.* (2013), Pak e Cho (1998), e Chen *et al.*(2007), este último representado pela equação 1.28, embora não se aproxime tanto como os restantes dos dados experimentais. Os modelos restantes que foram estudados apresentaram erros relativos acima de 20% relativamente às medições efetuadas, pelo que não foram tidos em consideração para este estudo.

Relativamente à concentração de 1,5%vol de nanotubos de carbono, e observando a figura 4.6, que mostra o gráfico de todos os modelos e dados experimentais tendo em conta essa concentração é possível reconhecer uma maior aproximação dos modelos de Yiamsawas *et al.* (2013) e de Pak e Cho (1998) dos valores empíricos, pois têm um erro relativo inferior a 20% relativamente a estes últimos.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

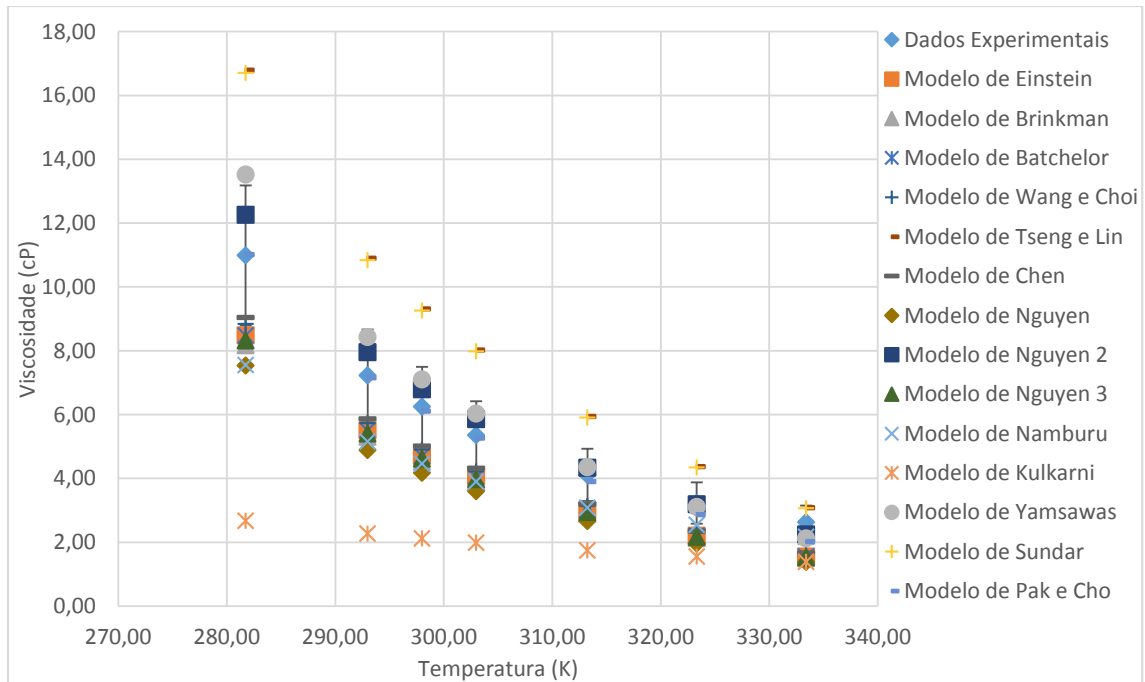


Figura 4.5: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 0,75%vol.

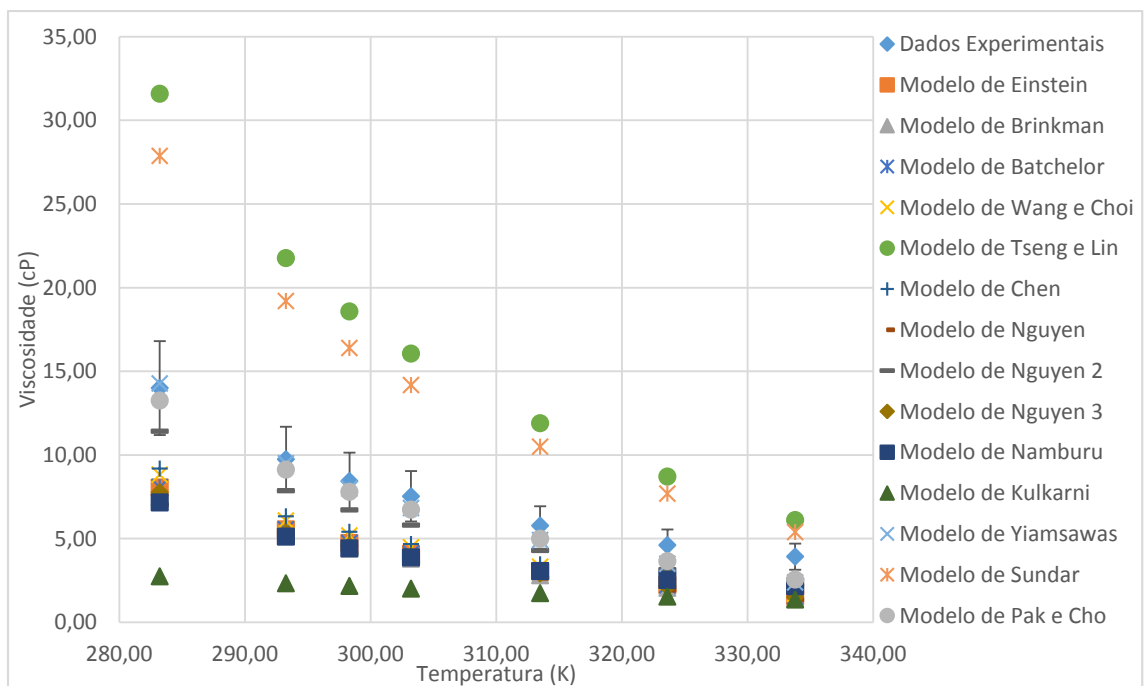


Figura 4.6: Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura comparando os dados experimentais obtidos para um nanofluido com uma concentração de 60% de etilenoglicol em água destilada e constituído por partículas de dimensão D60-100 L1-2 a uma concentração de 1,5%vol.

Partindo de todos estes resultados e desta análise comparativa entre os modelos teóricos desenvolvidos e os resultados empíricos foi possível concluir que o modelo mais homogêneo de todas as partículas é o de Yiamsawas *et al.* (2013). Este modelo não é para todas as partículas o mais aproximado, mas é aquele que em todas as partículas, em todas as concentrações destas no fluido base, e para todos os tipos de fluido base, aquele que, em média, mais se aproxima dos dados empíricos.

4.3. Escolha do modelo teórico mais aproximado aos dados experimentais

Partindo da análise efetuada na secção anterior, puderam-se retirar várias conclusões relativamente a qual o modelo mais apropriado para reger o comportamento reológico dos nanofluidos. Assim, é possível dividir as conclusões em grupos:

- Para fluidos com 30% de etilenoglicol e baixas concentrações de nanopartículas, os modelos que mais se aproximam dos valores de natureza empírica são o de Tseng e Lin (2003), de Nguyen *et al.*(b) (2007), assim como de Syam Sundar *et al.* (2014) e Pak e Cho (1998) e o de Yiamsawas *et al.* (2013), apesar deste último não se aproximar tanto quando comparados com os outros modelos;
- Para elevadas concentrações de nanotubos de carbono e fluido com 30% de etilenoglicol, não há nenhum modelo que se destaque, mas o de Yiamsawas *et al.* (2013), de Namburu *et al.* (2007), de Syam Sundar *et al.* (2014), e de Pak e Cho (1998) são os que mais frequentemente garantem erros relativos abaixo dos 20% com os valores empíricos;
- Para fluidos constituídos por 60% de etilenoglicol, e a uma concentração de 0,25% em volume de nanopartículas, os modelos que são comuns a todas as partículas com erros relativos mais baixos são o de Wang, Xu e S. Choi (1999), Tseng e Lin (2003), Nguyen *et al.*(b) (2007), Yiamsawas *et al.* (2013), Syam Sundar *et al.* (2014) e Pak e Cho (1998);
- Para o mesmo tipo fluido e maiores concentrações de partículas os modelos cujos valores de viscosidade se aproximam mais dos dados experimentais são o de Yiamsawas *et al.* (2013) e de Pak e Cho (1998).

Em consequência desta análise, chegou-se à conclusão que os modelos de Yiamsawas *et al.* (2013) e de Pak e Cho (1998) são os mais indicados para reger o comportamento reológico dos nanofluidos em análise. Contudo, e tal como foi referido na discussão da secção 3.3, os fatores que mais influenciam a viscosidade de um nanofluido são a viscosidade do fluido base, a concentração de nanopartículas e a temperatura, e esses fatores são as variáveis dependentes do

modelo de Yiamsawas *et al.* (2013), ao contrário do modelo de Pak e Cho (1998), em que apenas tem como variáveis dependentes a viscosidade do fluido base e a concentração de nanopartículas no nanofluido. Por esse motivo, apenas se vai ter em linha de conta o modelo de Yiamsawas *et al.* (2013) na análise seguinte.

O modelo de Yiamsawas *et al.* (2013) é baseado na equação 1.49, que se expressa da seguinte forma:

$$\mu_{nf} = A \times \varphi^B \times T^C \times \mu_{fb}^D,$$

O modelo baseia-se, como referido anteriormente, na influência da concentração das partículas, da viscosidade do fluido base e na temperatura do nanofluido, fatores que ao longo da análise efetuada no capítulo 3 se destacaram como os mais influentes na viscosidade dos nanofluidos. Yiamsawas *et al.* (2013) mediram a viscosidade de nanofluidos constituídos por nanopartículas de Al_2O_3 e TiO_2 suspensas numa mistura de água destilada e etilenoglicol na proporção 80:20. No entanto, para obter resultados tão próximos dos dados experimentais, as constantes da equação que foram usadas tiveram em conta apenas os valores referentes às partículas de Al_2O_3 :

$A = 0,891842$, $B = 0,739192$, $C = 0,099205$, $D = 0,9844$ para nanopartículas de Al_2O_3

No entanto, como é possível observar nas figuras seguintes, de 4.7 a 4.12, nem sempre o modelo de Yiamsawas *et al.* (2013) está próximo dos dados obtidos empiricamente, principalmente quando se consideram temperaturas mais elevadas. No entanto, em termos globais, este acaba por ser o modelo mais próximo dos resultados obtidos para todos os nanofluidos estudados.

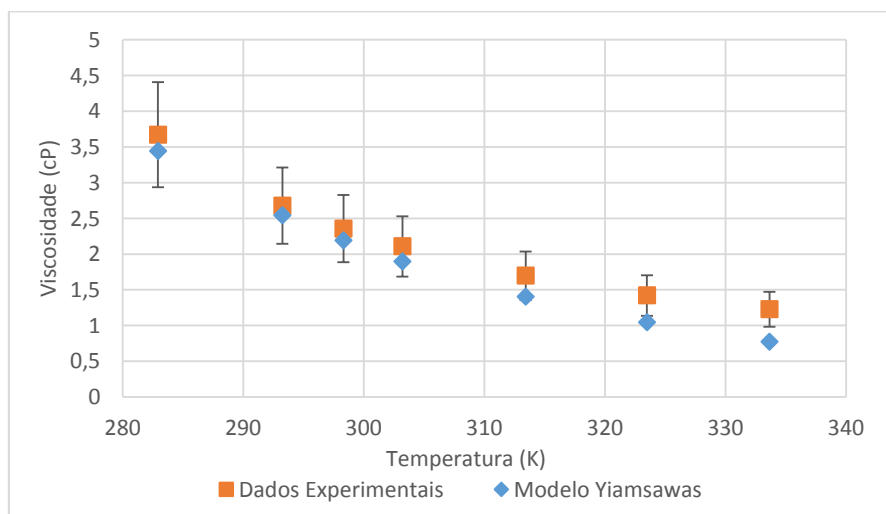


Figura 4.7: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 0,25%vol de partículas de D60-100 e L1-2.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

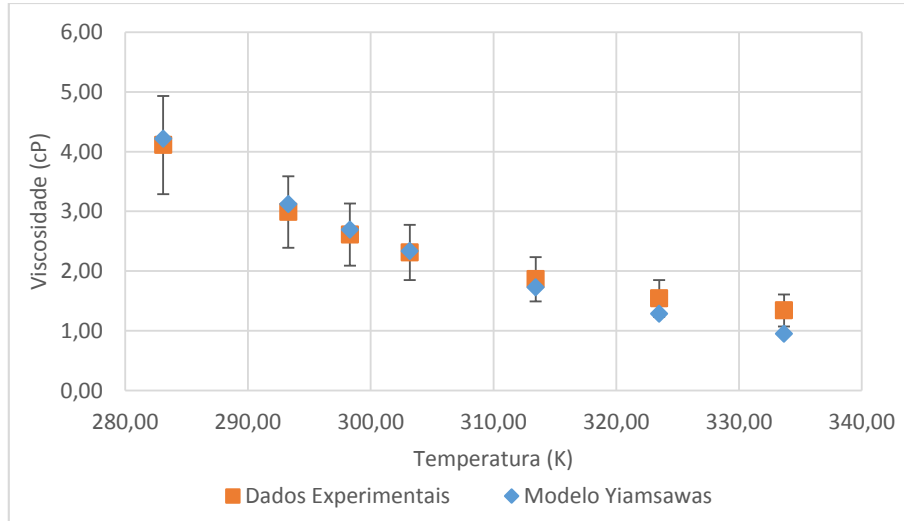


Figura 4.8: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 0,75%vol de partículas de D60-100 e L1-2.

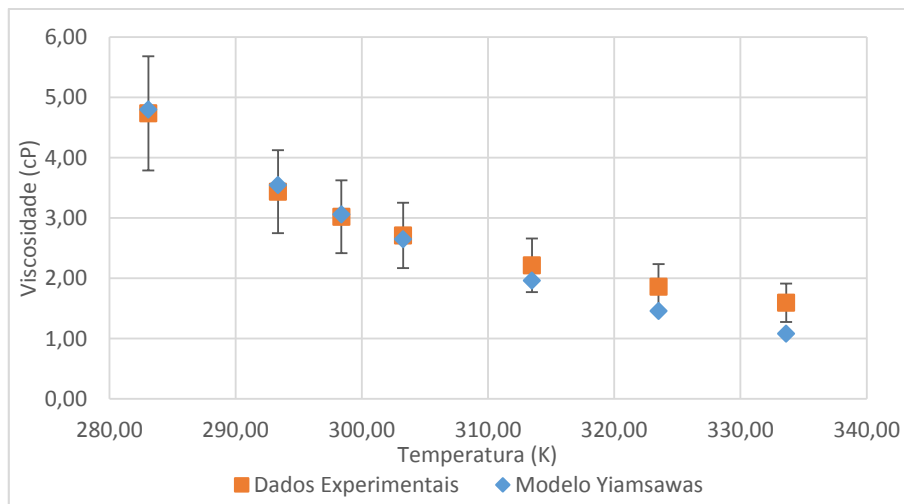


Figura 4.9: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 30% de etilenoglicol e 1,5%vol de partículas de D60-100 e L1-2.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

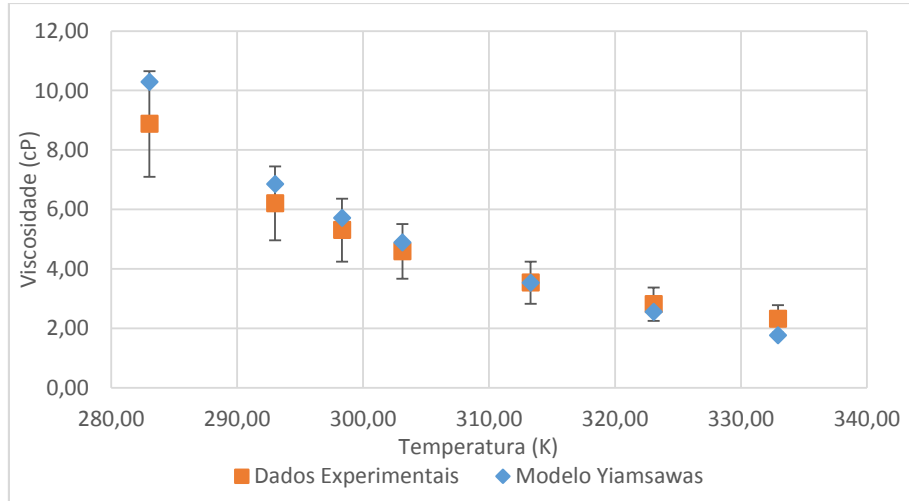


Figura 4.10: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 0,25%vol de partículas de D20-40 e L10-30.

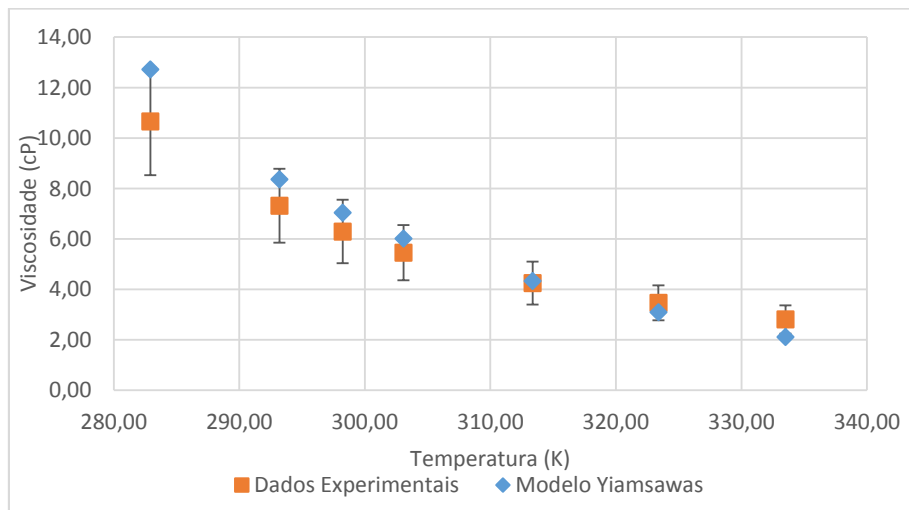


Figura 4.11: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 0,75%vol de partículas de D20-40 e L10-30.

Modelos Reológicos de Nanofluidos

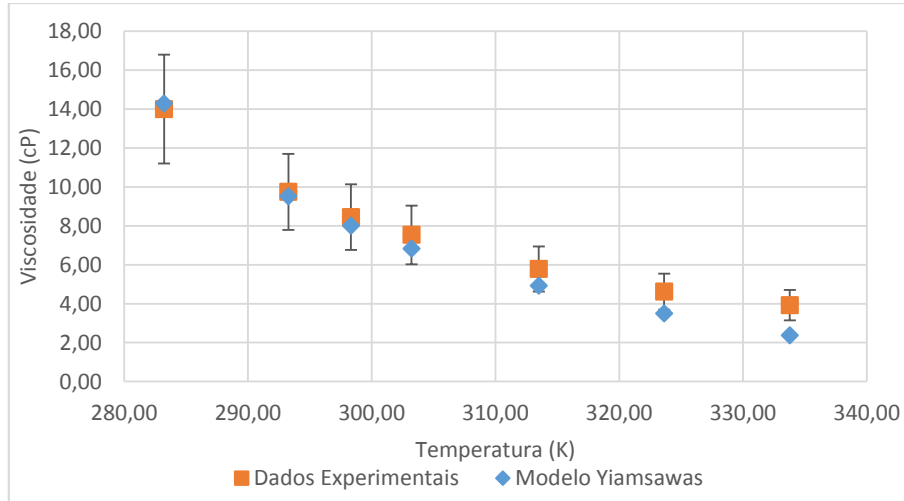


Figura 4.12: Gráfico comparativo do modelo de Yiamsawas com os dados obtidos empiricamente para um nanofluido constituído por um fluido base de uma solução aquosa de 60% de etilenoglicol e 1,5%vol de partículas de D20-40 e L10-30.

Como se pode observar pela análise dos gráficos anteriores, há uma tendência do modelo de se distanciar dos resultados experimentais para temperaturas acima dos 323K, o que poderá dever-se à já referida instabilidade do coloide acima dos 55°C (328K), conforme previsto, embora para outro tipo de constituição de nanofluidos, pelo modelo de Chen *et al.*, 2008.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Com este trabalho de dissertação foi possível conhecer de um modo pormenorizado os nanofluidos, e por que motivo podem ser considerados novos fluidos de permuta. De facto, ao terem uma maior condutividade térmica que os fluidos térmicos convencionais permitem-lhe promover uma maior taxa de transferência de calor para a mesma área de permuta, principalmente quando constituído por nanotubos de carbono, sem o risco de ocorrência de deposição de partículas e posterior sedimentação das mesmas, graças aos processos de dispersão da suspensão estudados.

Também foi possível concluir, pelos resultados experimentais obtidos, que um nanofluido se comporta essencialmente como um fluido Newtoniano, apesar de este ter uma tendência de pseudoplasticidade, ou seja, um comportamento típico de um fluido não-Newtoniano, quando a concentração de nanotubos de carbono de parede múltipla (*MWCNT*) é elevada, mais concretamente de 1,5%vol.

Finalizando, ao tentar modelar o comportamento reológico dos nanofluidos em estudo utilizando alguns modelos teóricos existentes para partículas esféricas, pôde-se concluir que na generalidade dos nanofluidos em estudo o modelo de Yiamsawas foi o que mais se aproximou dos dados experimentais, com erros médios relativos inferiores a 20%. Ainda assim, tendo em conta os resultados obtidos no teste deste modelo, foi possível concluir que o uso deste modelo só é fiável, isto é, só é possível obter a viscosidade com um erro relativo inferior a 20%, para os nanofluidos com concentrações até 1% de nanotubos de carbono em volume de solução e até a uma temperatura de 323K (50°C). Além deste modelo, existem outros modelos passíveis de ser utilizados para modelar o comportamento reológico dos nanofluidos, como o modelo de Pak e Cho, apesar de este também só poder ser usado até temperaturas de 323K e não ter uma regra relativamente às concentrações de partículas no nanofluido, isto é, por vezes não se pode usar em nanofluidos com baixa concentração de partículas e para outros tipos de partículas não pode ser utilizado para modelar o comportamento do fluido com elevadas concentrações de partículas.

Relativamente aos trabalhos futuros, os resultados obtidos com esta dissertação são encorajadores para a continuação do estudo de nanofluidos com nanotubos de carbono de parede múltipla, ou de outra geometria, pois estes tipos de fluidos têm um grande potencial de crescimento e ainda pouco se sabe sobre o comportamento destes. Seria interessante também alargar o estudo desta dissertação a partículas com uma grande amplitude de dimensões, com

diferentes comprimentos e diâmetros, assim como em diferentes concentrações volúmicas na solução, para estudar não só o comportamento reológico como também outras propriedades termofísicas essenciais para se conhecer melhor estes fluidos, de modo a poderem ser utilizados como fluidos térmicos de permuta contribuindo para melhorar a capacidade dos sistemas térmicos sem recorrer ao aumento de dimensões do mesmo.

6. Referências

ABU-NADA, E. - Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. 2009).

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

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

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

AVSEC, J.; OBLAK, M. - The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 2007).

BANERJEE, S.; WONG, SS - Functionalization of carbon nanotubes with a metal-containing molecular complex. **Nano Letters**. 2002).

BARNES, Howard A. - Thixotropy—a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. . ISSN 03770257. 70:1-2 (1997) 1–33. doi: 10.1016/S0377-0257(97)00004-9.

BATCHELOR, GK - The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics**. 1977).

BEHESHTI, Amir; SHANBEDI, Mehdi; HERIS, Saeed Zeinali - Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. . ISSN 1388-6150. 118:3 (2014) 1451–1460. doi: 10.1007/s10973-014-4048-0.

BHATTACHARYA, P. - Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 95:11 (2004) 6492. doi: 10.1063/1.1736319.

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

BRINKMAN, HC - The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The Journal of Chemical Physics**. 1952).

BRUGGEMAN, D. A. G. - Calculation of various physical constants in heterogeneous substances. I. Dielectric constants and conductivity of composites from isotropic substances. *Em*. 7., Vol.24. ed. [S.I.] : Annalen der Physik, 1935. ISBN 1521-3889. p. 636–679.

ÇENGEL, YA - **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática, 3ª Edição** [Em linha]. São Paulo : [s.n.] [Consult. 2 mar. 2015]. Disponível em WWW:<URL:https://scholar.google.pt/scholar?q=Transfer%C3%A7%C3%A3o+de+calor+e+massa+%C3%A7engel&btnG=&hl=pt-PT&as_sdt=0%2C5#1>.

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

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

CHEN, Haisheng *et al.* - Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology. **Particuology**. . ISSN 16742001. 7:2 (2009) 151–157. doi: 10.1016/j.partic.2009.01.005.

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

CHEN, Lifei *et al.* - Rheological Behaviors of Nanofluids Containing Multi-Walled Carbon Nanotube. **Journal of Dispersion Science and Technology**. . ISSN 0193-2691. 32:4 (2011) 550–554. doi: 10.1080/01932691003757223.

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

CHENG, NS; LAW, AWK - Exponential formula for computing effective viscosity. **Powder Technology**. 2003).

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

CHOI, Stephen U. S. - Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. Em **American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED** [Em linha]. [S.l.] : ASME, 1995 Disponível em WWW:<URL:http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0029427666&partnerID=tZOtx3y1>.

CZARNETZKI, W.; ROETZEL, W. - Temperature oscillation techniques for simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity. **International Journal of Thermophysics**. 1995).

DAS, Sarit K.; PUTRA, Nandy; ROETZEL, Wilfried - Pool boiling characteristics of nano-fluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 46:5 (2003) 851–862. doi: 10.1016/S0017-9310(02)00348-4.

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

DAS, SK *et al.* - Nanofluids: science and technology. 2007).

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

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

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

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

EASTMAN, J. A. *et al.* - Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids. **MRS Proceedings**. . ISSN 1946-4274. 457:1996). doi: 10.1557/PROC-457-3.

EINSTEIN, A. - Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. **Annalen der Physik**. 1906).

ESUMI, K. *et al.* - Chemical treatment of carbon nanotubes. **Carbon**. 1996).

FRANKEL, NA; ACRIVOS, A. - On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. **Chemical Engineering Science**. 1967).

FULLMAN, RL - Measurement of particle sizes in opaque bodies. 1991).

GANGACHARYULU, D. - Preparation and characterization of nanofluids and some investigation in biological applications. **Mechanical engineering. Carbondale: Southern Illinois University**. 104:2010).

GHADIMI, A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, H. S. C. - A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 54:17-18 (2011) 4051–4068. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.

GRAHAM, AL - On the viscosity of suspensions of solid spheres. **Applied Scientific Research**. 1981).

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

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. - Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**. . ISSN 0196-4313. 1:3 (1962) 187–191. doi: 10.1021/i160003a005.

HAN, Dongxiao *et al.* - Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption. **Nanoscale research letters**. . ISSN 1556-276X. 6:2011) 457. doi: 10.1186/1556-276X-6-457.

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

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

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

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

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

HOSSEINI, S. Masoud; MOGHADASSI, A. R.; HENNEKE, Dale E. - A new dimensionless group model for determining the viscosity of nanofluids. Em **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. ISBN 1388-6150r1572-8943

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

HUANG, Jin *et al.* - Influence of pH on the Stability Characteristics of Nanofluids. Em **2009 Symposium on Photonics and Optoelectronics** [Em linha]. [S.l.] : IEEE eXpress Conference Publishing, Ago. 2009 [Consult. 10 jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=5230102>. ISBN 978-1-4244-4412-0

HWANG, Y. *et al.* - Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. **Current Applied Physics**. 2006).

IIJIMA, S. - Helical microtubules of graphitic carbon. **nature**. 1991).

INCROPERA, FP - **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. [S.l.] : Wiley, 2006., 2006. ISBN 978- 0-471-45728-2.

JAHANSHAHI, M. *et al.* - 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**. . ISSN 0735-1933. 37:6 (2010) 687–694. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.03.010.

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

JOSÉ-YACAMÁN, M. *et al.* - Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 62:2 (1993) 202. doi: 10.1063/1.109315.

KANAGARAJ, S.; PONMOZHI, J.; VARANDA, FR - Rheological study of nanofluids at different concentration of carbon nanotubes. **19th national & 8th ISHMT-ASME heat mass transfer conf January**. 2008) 3–5.

KEBLINSKI, P. *et al.* - Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 45:4 (2002) 855–863. doi: 10.1016/S0017-9310(01)00175-2.

KEIDAR, M.; WAAS, AM - On the conditions of carbon nanotube growth in the arc discharge. **Nanotechnology**. 2004).

KHAN, MG; FARTAJ, A. - A review on microchannel heat exchangers and potential applications. **International Journal of Energy Research**. 2011).

KIM, HJ; BANG, IC; ONOE, J. - Characteristic stability of bare Au-water nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. **Optics and Lasers in Engineering**. 2009).

KIM, JY; HAN, SI; HONG, S. - Effect of modified carbon nanotube on the properties of aromatic polyester nanocomposites. **Polymer**. 2008).

KINLOCH, IA; ROBERTS, SA; WINDLE, AH - A rheological study of concentrated aqueous nanotube dispersions. **Polymer**. 2002).

KITANO, T.; KATAOKA, T.; SHIROTA, T. - An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers. **Rheologica Acta**. 1981).

KO, Gwon Hyun *et al.* - An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 50:23-24 (2007) 4749–4753. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.029.

KOLE, Madhusree; DEY, T. K. - Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. **Experimental Thermal and Fluid Science**. . ISSN 08941777. 34:6 (2010) 677–683. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.12.009.

KRIEGER, Irvin M. - A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres. **Journal of Rheology**. . ISSN 01486055. 3:1 (1959) 137. doi: 10.1122/1.548848.

KULKARNI, Devdatta P.; DAS, Debendra K.; CHUKWU, Godwin A. - Temperature Dependent Rheological Property of Copper Oxide Nanoparticles Suspension (Nanofluid). **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. . ISSN 15334880. 6:4 (2006) 1150–1154. doi: 10.1166/jnn.2006.187.

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

KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. - Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. **Thermochimica Acta**. 2012).

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

LAMAS, Bruno *et al.* - Numerical analysis of percolation formation in carbon nanotube based nanofluids. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**. . ISSN 00295981. 95:3 (2013) 257–270. doi: 10.1002/nme.4510.

LAMAS, Bruno C. *et al.* - EG/CNTs Nanofluids Engineering and Thermo-Rheological Characterization. Em **Journal of Nano Research** [Em linha] [Consult. 3 mar. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://www.scientific.net/JNanoR.13.69>. ISBN 978-3-03835-833-6

LAMAS, Bruno Cardoso - **Nanofluids development and characterization for heat exchanging intensification** [Em linha]. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2013 Disponível em WWW:<URL:http://hdl.handle.net/10773/12095>.

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

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

LEONG, KC; YANG, C.; MURSHED, SMS - A model for the thermal conductivity of nanofluids–the effect of interfacial layer. **Journal of nanoparticle research**. 2006).

LI, Y. *et al.* - A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**. 2009).

LU, Wen-Qiang; FAN, Qing-Mei - Study for the particle’s scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**. . ISSN 09557997. 32:4 (2008) 282–289. doi: 10.1016/j.enganabound.2007.10.006.

LUNDGREN, TS - Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. **Journal of Fluid Mechanics**. 1972).

MASOUMI, N.; SOHRABI, N.; BEHZADMEHR, A. - A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. **Journal of Physics D: Applied Physics**. . ISSN 0022-3727. 42:5 (2009) 055501. doi: 10.1088/0022-3727/42/5/055501.

MAXWELL, JC - A treatise on electricity and magnetism. 1881).

MENG, Zhaoguo *et al.* - Carbon nanotube glycol nanofluids: Photo-thermal properties, thermal conductivities and rheological behavior. **Particuology**. . ISSN 16742001. 10:5 (2012) 614–618. doi: 10.1016/j.partic.2012.04.001.

MERCHAN-MERCHAN, Wilson *et al.* - Combustion synthesis of carbon nanotubes and related nanostructures. **Progress in Energy and Combustion Science**. . ISSN 03601285. 36:6 (2010) 696–727. doi: 10.1016/j.pecs.2010.02.005.

MEYYAPPAN, M. - Carbon nanotubes: science and applications. 2004).

MISSANA, T.; ADELL, A. - On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability. **Journal of Colloid and Interface Science**. 2000).

MOHAMMED, H. A. *et al.* - Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 15:3 (2011) 1502–1512. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.031.

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. - Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 47:5 (2008) 560–568. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004.

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

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

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

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

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

NELSON, Ian C.; BANERJEE, Debjyoti; PONNAPPAN, Rengasamy - Flow Loop Experiments Using Polyalphaolefin Nanofluids. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**. . ISSN 0887-8722. 23:4 (2009) 752–761. doi: 10.2514/1.31033.

NETO, JBR - Deffloculation mechanisms of colloidal clay suspensions. **Materials Science and Engineering (in Portuguese)**. 1999).

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

NGUYEN, C. T. *et al.* - Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? **International Journal of Thermal Sciences**. . ISSN 12900729. 47:2 (2008) 103–111. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.01.033.

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

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

PAUL, G.; PAL, T.; MANNA, I. - Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. **Journal of colloid and interface science**. 2010).

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

PONMOZHI, J. *et al.* - Thermodynamic and Transport Properties of CNT-Water Based Nanofluids. Em **Journal of Nano Research** [Em linha] [Consult. 10 jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://www.scientific.net/JNanoR.11.101>. ISBN 978-3-03835-831-2

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

PRASHER, Ravi *et al.* - Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. **Applied Physics Letters**. . ISSN 00036951. 89:13 (2006) 133108. doi: 10.1063/1.2356113.

PUTRA, Nandy; ROETZEL, Wilfried; DAS, Sarit K. - Natural convection of nano-fluids. **Heat and Mass Transfer**. . ISSN 0947-7411. 39:8-9 (2002) 775–784. doi: 10.1007/s00231-002-0382-z.

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

RAMESH, G.; PRABHU, NK - Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment. **Nanoscale research letters**. 2011).

REID, RC; PRAUSNITZ, JM; POLING, BE - The properties of gases and liquids. 1987).

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

SETARAM - Setsys Evolution. 2013).

SHAFFER, MSP; FAN, X.; WINDLE, AH - Dispersion and packing of carbon nanotubes. **Carbon**. 1998).

SHIM, JW; PARK, SJ; RYU, SK - Effect of modification with HNO₃ and NaOH on metal adsorption by pitch-based activated carbon fibers. **Carbon**. 2001).

SIDDIQUE, M.; KHALED, ARA - Recent advances in heat transfer enhancements: a review report. **International Journal of Chemical Engineering**. 2010). doi: 10.1155/2010/106461.

SUNDAR, LS *et al.* - Temperature dependent flow characteristics of Al₂O₃ nanofluid. **Int J Nanotechnol Appl**. 2007).

SYAM SUNDAR, L. *et al.* - Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. **Chemical Physics Letters**. . ISSN 00092614. 554:2012) 236–242. doi: 10.1016/j.cplett.2012.10.042.

SYAM SUNDAR, L. *et al.* - Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids for heat transfer applications: An experimental study. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 56:2014) 86–95. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.06.009.

TALAEI, Zeinab *et al.* - The effect of functionalized group concentration on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube fluid as heat transfer media. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 38:4 (2011) 513–517. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.12.035.

TIMOFEEVA, Elena V.; ROUTBORT, Jules L.; SINGH, Dileep - Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. **Journal of Applied Physics**. . ISSN 00218979. 106:1 (2009) 014304. doi: 10.1063/1.3155999.

TSENG, Wenjea J.; LIN, Kuang-Chih - Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions. **Materials Science and Engineering: A**. . ISSN 09215093. 355:1-2 (2003) 186–192. doi: 10.1016/S0921-5093(03)00063-7.

TURGUT, A. *et al.* - Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids. **International Journal of Thermophysics**. . ISSN 0195-928X. 30:4 (2009) 1213–1226. doi: 10.1007/s10765-009-0594-2.

VAISMAN, Linda; WAGNER, H. Daniel; MAROM, Gad - The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. **Advances in colloid and interface science**. . ISSN 0001-8686. 128-130:2006) 37–46. doi: 10.1016/j.cis.2006.11.007.

VAJJHA, R. S.; DAS, D. K.; MAHAGAONKAR, B. M. - Density Measurement of Different Nanofluids and Their Comparison With Theory. **Petroleum Science and Technology**. . ISSN 1091-6466. 27:6 (2009) 612–624. doi: 10.1080/10916460701857714.

VAJJHA, RS; DAS, DK - Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations. **Journal of heat transfer**. 2009).

VEINGNON, Somjate *et al.* - Development of Carbon Nanotube - Reinforced Silk and Cannabis Fibers by an Electrophoretic Deposition Method. **Materials Science Forum**. . ISSN 02555476. 695:2011) 377–380. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.695.377.

WANG, Bu Xuan *et al.* - On the specific heat capacity of CuO nanofluid. **Advances in Mechanical Engineering**. . ISSN 16878132. 2010:2010). doi: 10.1155/2010/172085.

WANG, Xinwei; XU, Xianfan; S. CHOI, Stephen U. - Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**. . ISSN 0887-8722. 13:4 (1999) 474–480. doi: 10.2514/2.6486.

WANG, XQ; MUJUMDAR, AS - Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. **International journal of thermal sciences**. 2007).

WHITE, FM - Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1991. [s.d.]).

XIE, H. *et al.* - Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. **Journal of Applied Physics**. 2003).

XIE, H.; CHEN, L. - Review on the preparation and thermal performances of carbon nanotube contained nanofluids. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 2011).

XU, J. *et al.* - Shear and extensional rheology of carbon nanofiber suspensions. **Rheologica acta**. 2005).

XUAN, Y.; LI, Q. - Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. 2000).

XUAN, Y.; ROETZEL, W. - Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of heat and Mass transfer**. 2000).

XUAN, Yimin; LI, Qiang - Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. . ISSN 0142727X. 21:1 (2000) 58–64. doi: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3.

XUE, QZ - Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Physica B: Condensed Matter**. 2005).

YANG, Ying *et al.* - Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. . ISSN 00179310. 48:6 (2005) 1107–1116. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.038.

YAWS, CL - Physical Properties: A Guide to the Physical, Thermodynamic, and Transport Property Data of Industrially Important Chemical Compounds. 1977).

YIAMSAWAS, Thaklaew *et al.* - Measurement and Correlation of the Viscosity of Water-Based Al₂O₃ and TiO₂ Nanofluids in High Temperatures and Comparisons with Literature Reports. **Journal of Dispersion Science and Technology**. . ISSN 0193-2691. 34:12 (2013) 1697–1703. doi: 10.1080/01932691.2013.764483.

YU, W. *et al.* - Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Powder Technology**. 2010).

YU, W.; CHOI, SUS - The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**. 2003).

YU, Wei *et al.* - Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. **Particuology**. . ISSN 16742001. 9:2 (2011) 187–191. doi: 10.1016/j.partic.2010.05.014.

ZHANG, X.; GU, H.; FUJII, M. - Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. **Experimental Thermal and Fluid Science**. 2007).

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

7. Anexos

7.1. Resumo das medições efetuadas

Tabela 7.1: Resumo de todas as medições efetuadas

| Fluido base | Nanotubo de carbono | Concentração ϕ [%vol] | Temperatura [K] |
|-------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| AD+30%EG | d20-40 I1-2 | 0,25% | 283,15 a 333,15 |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |
| | d20-40 I10-30 | 0,25% | |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |
| | d60-100 I1-2 | 0,25% | |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |
| AD+60%EG | d20-40 I5-15 | 0,25% | |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |
| | d20-40 I10-30 | 0,25% | |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |
| | d60-100 I1-2 | 0,25% | |
| | | 0,50% | |
| | | 0,75% | |
| | | 1,00% | |
| | | 1,50% | |

7.2. Análise de Erros

Como foi referido na secção 2.7, foi verificada a repetibilidade e precisão da amostra, calculando o erro da viscosidade em relação ao valor médio de cada valor considerado para análise, tendo sido calculado o desvio padrão da amostra e com um grau de confiança de 95%, numa distribuição de T-Student, o erro da viscosidade medida pode ser dado pela expressão:

$$\Delta v = t_{,975} \times \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

onde σ é o desvio padrão da amostra, dado pela equação:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \times \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}, \text{ onde } \bar{v} \text{ corresponde ao valor médio da viscosidade da amostra.}$$

Na primeira equação desta subsecção, $t_{,975}$ é o valor de T-student tabelado tendo em conta o tamanho da amostra (N), cujo valor se encontra na tabela seguinte.

Tabela 7.2: Distribuição de T-Student

| Tabela da distribuição de T-Student | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| Probabilidade | t.75 | t.80 | t.85 | t.90 | t.95 | t.975 | t.99 | t.995 | t.9975 | t.999 | t.9995 | |
| Tamanho da População | 1 | 1 | 1,376 | 1,963 | 3,078 | 6,314 | 12,71 | 31,82 | 63,66 | 127,3 | 318,31 | 636,62 |
| | 2 | 0,816 | 1,061 | 1,386 | 1,886 | 2,92 | 4,303 | 6,965 | 9,925 | 14,09 | 22,33 | 31,6 |
| | 3 | 0,765 | 0,978 | 1,25 | 1,638 | 2,353 | 3,182 | 4,541 | 5,841 | 7,453 | 10,21 | 12,92 |
| | 4 | 0,741 | 0,941 | 1,19 | 1,533 | 2,132 | 2,776 | 3,747 | 4,604 | 5,598 | 7,173 | 8,61 |
| | 5 | 0,727 | 0,92 | 1,156 | 1,476 | 2,015 | 2,571 | 3,365 | 4,032 | 4,773 | 5,893 | 6,869 |
| | 6 | 0,718 | 0,906 | 1,134 | 1,44 | 1,943 | 2,447 | 3,143 | 3,707 | 4,317 | 5,208 | 5,959 |
| | 7 | 0,711 | 0,896 | 1,119 | 1,415 | 1,895 | 2,365 | 2,998 | 3,499 | 4,029 | 4,785 | 5,408 |
| | 8 | 0,706 | 0,889 | 1,108 | 1,397 | 1,86 | 2,306 | 2,896 | 3,355 | 3,833 | 4,501 | 5,041 |
| | 9 | 0,703 | 0,883 | 1,1 | 1,383 | 1,833 | 2,262 | 2,821 | 3,25 | 3,69 | 4,297 | 4,781 |
| | 10 | 0,7 | 0,879 | 1,093 | 1,372 | 1,812 | 2,228 | 2,764 | 3,169 | 3,581 | 4,144 | 4,587 |
| | 11 | 0,697 | 0,876 | 1,088 | 1,363 | 1,796 | 2,201 | 2,718 | 3,106 | 3,497 | 4,025 | 4,437 |
| | 12 | 0,695 | 0,873 | 1,083 | 1,356 | 1,782 | 2,179 | 2,681 | 3,055 | 3,428 | 3,93 | 4,318 |
| | 13 | 0,694 | 0,87 | 1,079 | 1,35 | 1,771 | 2,16 | 2,65 | 3,012 | 3,372 | 3,852 | 4,221 |
| | 14 | 0,692 | 0,868 | 1,076 | 1,345 | 1,761 | 2,145 | 2,624 | 2,977 | 3,326 | 3,787 | 4,14 |
| | 15 | 0,691 | 0,866 | 1,074 | 1,341 | 1,753 | 2,131 | 2,602 | 2,947 | 3,286 | 3,733 | 4,073 |
| | 16 | 0,69 | 0,865 | 1,071 | 1,337 | 1,746 | 2,12 | 2,583 | 2,921 | 3,252 | 3,686 | 4,015 |
| | 17 | 0,689 | 0,863 | 1,069 | 1,333 | 1,74 | 2,11 | 2,567 | 2,898 | 3,222 | 3,646 | 3,965 |
| | 18 | 0,688 | 0,862 | 1,067 | 1,33 | 1,734 | 2,101 | 2,552 | 2,878 | 3,197 | 3,61 | 3,922 |
| | 19 | 0,688 | 0,861 | 1,066 | 1,328 | 1,729 | 2,093 | 2,539 | 2,861 | 3,174 | 3,579 | 3,883 |
| | 20 | 0,687 | 0,86 | 1,064 | 1,325 | 1,725 | 2,086 | 2,528 | 2,845 | 3,153 | 3,552 | 3,85 |
| | 21 | 0,686 | 0,859 | 1,063 | 1,323 | 1,721 | 2,08 | 2,518 | 2,831 | 3,135 | 3,527 | 3,819 |
| | 22 | 0,686 | 0,858 | 1,061 | 1,321 | 1,717 | 2,074 | 2,508 | 2,819 | 3,119 | 3,505 | 3,792 |
| | 23 | 0,685 | 0,858 | 1,06 | 1,319 | 1,714 | 2,069 | 2,5 | 2,807 | 3,104 | 3,485 | 3,767 |
| | 24 | 0,685 | 0,857 | 1,059 | 1,318 | 1,711 | 2,064 | 2,492 | 2,797 | 3,091 | 3,467 | 3,745 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| 25 | 0,684 | 0,856 | 1,058 | 1,316 | 1,708 | 2,06 | 2,485 | 2,787 | 3,078 | 3,45 | 3,725 |
| 26 | 0,684 | 0,856 | 1,058 | 1,315 | 1,706 | 2,056 | 2,479 | 2,779 | 3,067 | 3,435 | 3,707 |
| 27 | 0,684 | 0,855 | 1,057 | 1,314 | 1,703 | 2,052 | 2,473 | 2,771 | 3,057 | 3,421 | 3,69 |
| 28 | 0,683 | 0,855 | 1,056 | 1,313 | 1,701 | 2,048 | 2,467 | 2,763 | 3,047 | 3,408 | 3,674 |
| 29 | 0,683 | 0,854 | 1,055 | 1,311 | 1,699 | 2,045 | 2,462 | 2,756 | 3,038 | 3,396 | 3,659 |
| 30 | 0,683 | 0,854 | 1,055 | 1,31 | 1,697 | 2,042 | 2,457 | 2,75 | 3,03 | 3,385 | 3,646 |
| 40 | 0,681 | 0,851 | 1,05 | 1,303 | 1,684 | 2,021 | 2,423 | 2,704 | 2,971 | 3,307 | 3,551 |
| 50 | 0,679 | 0,849 | 1,047 | 1,299 | 1,676 | 2,009 | 2,403 | 2,678 | 2,937 | 3,261 | 3,496 |
| 60 | 0,679 | 0,848 | 1,045 | 1,296 | 1,671 | 2 | 2,39 | 2,66 | 2,915 | 3,232 | 3,46 |
| 80 | 0,678 | 0,846 | 1,043 | 1,292 | 1,664 | 1,99 | 2,374 | 2,639 | 2,887 | 3,195 | 3,416 |
| 100 | 0,677 | 0,845 | 1,042 | 1,29 | 1,66 | 1,984 | 2,364 | 2,626 | 2,871 | 3,174 | 3,39 |
| 120 | 0,677 | 0,845 | 1,041 | 1,289 | 1,658 | 1,98 | 2,358 | 2,617 | 2,86 | 3,16 | 3,373 |
| ∞ | 0,674 | 0,842 | 1,036 | 1,282 | 1,645 | 1,96 | 2,326 | 2,576 | 2,807 | 3,09 | 3,291 |
| Distribuição normal | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 95% | 98% | 99% | 99,50% | 99,80% | 99,90% |

7.3. Tabelas de resultados

Nesta secção estão os resultados da viscosidade para cada nanofluido e para cada concentração de nanopartículas. A viscosidade está expressa em cP (centi-Poise) e as temperaturas em K (Kelvin). A acompanhar os valores de viscosidade estão os respetivos erros associados a cada valor, cuja incerteza representa um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 7.3: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d20-40 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,088 ± 0,014 | 2,990 ± 0,012 | 2,645 ± 0,010 | 2,372 ± 0,011 | 1,945 ± 0,011 | 1,643 ± 0,011 | 1,394 ± 0,008 |
| | 132,00 | 4,017 ± 0,003 | 2,936 ± 0,004 | 2,584 ± 0,006 | 2,277 ± 0,007 | 1,867 ± 0,005 | 1,544 ± 0,006 | 1,314 ± 0,005 |
| | 171,60 | 4,016 ± 0,004 | 2,930 ± 0,002 | 2,570 ± 0,004 | 2,285 ± 0,004 | 1,825 ± 0,004 | 1,501 ± 0,002 | 1,269 ± 1E-12 |
| | 211,20 | 3,993 ± 1E-15 | 2,943 ± 0,002 | 2,561 ± 0,004 | 2,261 ± 0,004 | 1,806 ± 0,004 | 1,500 ± 1E-12 | 1,268 ± 0,004 |
| | 250,80 | 4,037 ± 0,003 | 2,959 ± 0,002 | 2,597 ± 0,004 | 2,272 ± 0,002 | 1,821 ± 0,005 | 1,537 ± 0,004 | 1,313 ± 0,002 |
| | 290,40 | 4,056 ± 0,003 | 2,999 ± 0,001 | 2,647 ± 0,002 | 2,304 ± 3E-16 | 1,843 ± 0,002 | 1,533 ± 0,003 | 1,323 ± 0,001 |
| | 330,00 | 4,084 ± 0,002 | 2,968 ± 0,002 | 2,641 ± 0,001 | 2,316 ± 2E-16 | 1,834 ± 0,002 | 1,536 ± 3E-16 | 1,405 ± 0,001 |

Tabela 7.4: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d20-40 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,437 ± 0,018 | 3,302 ± 0,008 | 2,874 ± 0,011 | 2,577 ± 0,009 | 2,101 ± 0,010 | 1,745 ± 0,008 | 1,460 ± 0,011 |
| | 132,00 | 4,349 ± 0,010 | 3,183 ± 0,006 | 2,771 ± 0,006 | 2,465 ± 0,004 | 2,029 ± 0,006 | 1,654 ± 0,004 | 1,467 ± 0,004 |
| | 171,60 | 4,304 ± 0,006 | 3,163 ± 0,004 | 2,767 ± 0,003 | 2,469 ± 5E-16 | 1,979 ± 0,004 | 1,637 ± 0,003 | 1,388 ± 0,004 |
| | 211,20 | 4,303 ± 0,005 | 3,169 ± 0,003 | 2,761 ± 0,003 | 2,473 ± 0,002 | 1,964 ± 0,004 | 1,630 ± 0,002 | 1,372 ± 0,003 |
| | 250,80 | 4,325 ± 0,002 | 3,211 ± 0,003 | 2,782 ± 0,002 | 2,483 ± 0,005 | 1,983 ± 0,005 | 1,652 ± 0,003 | 1,390 ± 0,002 |
| | 290,40 | 4,308 ± 7E-16 | 3,218 ± 0,001 | 2,808 ± 1E-12 | 2,486 ± 0,002 | 2,004 ± 0,002 | 1,677 ± 4E-16 | 1,436 ± 0,003 |
| | 330,00 | 4,334 ± 0,002 | 3,222 ± 0,002 | 2,819 ± 0,001 | 2,489 ± 0,002 | 1,996 ± 0,002 | 1,675 ± 0,003 | 1,434 ± 0,002 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.5: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d20-40 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 5,126 ± 0,025 | 3,647 ± 0,019 | 3,200 ± 0,021 | 2,878 ± 0,030 | 2,309 ± 0,021 | 1,912 ± 0,021 | 1,635 ± 0,023 |
| | 132,00 | 5,131 ± 0,005 | 3,566 ± 0,006 | 3,142 ± 0,007 | 2,774 ± 0,006 | 2,194 ± 0,006 | 1,825 ± 0,010 | 1,550 ± 0,011 |
| | 171,60 | 5,122 ± 0,002 | 3,611 ± 0,005 | 3,142 ± 0,003 | 2,783 ± 0,004 | 2,207 ± 0,009 | 1,804 ± 0,006 | 1,520 ± 0,007 |
| | 211,20 | 5,138 ± 0,002 | 3,618 ± 9E-16 | 3,181 ± 0,003 | 2,831 ± 5E-16 | 2,237 ± 0,008 | 1,828 ± 0,009 | 1,575 ± 0,005 |
| | 250,80 | 5,145 ± 0,003 | 3,662 ± 2E-16 | 3,189 ± 0,003 | 2,827 ± 0,002 | 2,243 ± 0,005 | 1,868 ± 0,004 | 1,572 ± 0,006 |
| | 290,40 | 5,127 ± 0,002 | 3,666 ± 0,001 | 3,216 ± 0,002 | 2,845 ± 0,003 | 2,256 ± 0,003 | 1,868 ± 0,009 | 1,599 ± 0,004 |
| | 330,00 | 5,118 ± 0,005 | 3,684 ± 0,002 | 3,240 ± 0,001 | 2,855 ± 0,005 | 2,259 ± 0,005 | 1,860 ± 0,008 | 1,612 ± 0,007 |

Tabela 7.6: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d20-40 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 5,253 ± 0,016 | 3,830 ± 0,019 | 3,330 ± 0,015 | 2,981 ± 0,014 | 2,435 ± 0,013 | 2,042 ± 0,015 | 1,782 ± 0,015 |
| | 132,00 | 5,228 ± 0,009 | 3,753 ± 0,008 | 3,240 ± 0,004 | 2,904 ± 0,007 | 2,302 ± 0,007 | 1,949 ± 0,008 | 1,689 ± 0,008 |
| | 171,60 | 5,228 ± 0,004 | 3,804 ± 0,003 | 3,310 ± 0,008 | 2,912 ± 0,004 | 2,315 ± 0,005 | 1,908 ± 0,005 | 1,652 ± 0,005 |
| | 211,20 | 5,174 ± 7E-16 | 3,802 ± 0,003 | 3,310 ± 0,004 | 2,953 ± 0,004 | 2,325 ± 0,003 | 1,922 ± 0,004 | 1,631 ± 0,003 |
| | 250,80 | 5,174 ± 0,003 | 3,741 ± 0,001 | 3,313 ± 0,002 | 2,960 ± 0,003 | 2,408 ± 0,003 | 2,012 ± 0,003 | 1,698 ± 0,003 |
| | 290,40 | 5,113 ± 0,001 | 3,736 ± 2E-16 | 3,313 ± 1E-12 | 2,958 ± 0,001 | 2,390 ± 0,002 | 2,018 ± 3E-16 | 1,707 ± 0,003 |
| | 330,00 | 5,145 ± 0,002 | 3,693 ± 0,033 | 3,280 ± 0,002 | 2,987 ± 0,001 | 2,389 ± 0,002 | 2,004 ± 0,001 | 1,714 ± 0,001 |

Tabela 7.7: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d20-40 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 6,263 ± 0,014 | 4,569 ± 0,017 | 4,030 ± 0,018 | 3,592 ± 0,017 | 2,914 ± 0,018 | 2,472 ± 0,015 | 2,149 ± 0,017 |
| | 132,00 | 6,143 ± 0,005 | 4,417 ± 0,005 | 3,880 ± 0,006 | 3,470 ± 0,006 | 2,777 ± 0,006 | 2,332 ± 0,007 | 2,001 ± 0,005 |
| | 171,60 | 6,098 ± 0,004 | 4,384 ± 4E-16 | 3,854 ± 0,002 | 3,435 ± 0,003 | 2,763 ± 0,004 | 2,307 ± 5E-16 | 1,970 ± 0,005 |
| | 211,20 | 6,022 ± 0,003 | 4,405 ± 1E-12 | 3,862 ± 7E-16 | 3,432 ± 0,006 | 2,757 ± 0,002 | 2,299 ± 0,006 | 2,027 ± 0,004 |
| | 250,80 | 5,936 ± 3E-16 | 4,404 ± 1E-15 | 3,852 ± 4E-16 | 3,419 ± 0,003 | 2,763 ± 7E-16 | 2,336 ± 5E-16 | 1,989 ± 0,009 |
| | 290,40 | 5,903 ± 0,001 | 4,368 ± 0,003 | 3,858 ± 4E-16 | 3,435 ± 0,001 | 2,768 ± 1E-12 | 2,304 ± 5E-16 | 2,017 ± 0,001 |
| | 330,00 | 5,939 ± 1E-15 | 4,355 ± 1E-12 | 3,839 ± 0,001 | 3,423 ± 0,002 | 2,747 ± 2E-16 | 2,294 ± 0,002 | 1,992 ± 2E-16 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.8: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s ⁻¹) | 92,40 | 3,698 ± 0,023 | 2,767 ± 0,022 | 2,473 ± 0,020 | 2,200 ± 0,021 | 1,816 ± 0,018 | 1,513 ± 0,020 | 1,438 ± 0,027 |
| | 132,00 | 3,604 ± 0,008 | 2,685 ± 0,008 | 2,384 ± 0,007 | 2,093 ± 0,009 | 1,751 ± 0,011 | 1,482 ± 0,017 | 1,362 ± 0,011 |
| | 171,60 | 3,564 ± 0,004 | 2,677 ± 0,004 | 2,362 ± 0,004 | 2,094 ± 0,004 | 1,714 ± 0,005 | 1,423 ± 0,006 | 1,394 ± 0,039 |
| | 211,20 | 3,633 ± 0,003 | 2,732 ± 0,005 | 2,438 ± 0,005 | 2,134 ± 0,008 | 1,727 ± 0,004 | 1,496 ± 0,017 | 1,495 ± 0,037 |
| | 250,80 | 3,662 ± 2E-16 | 2,734 ± 0,002 | 2,425 ± 0,003 | 2,187 ± 0,013 | 1,778 ± 0,006 | 1,519 ± 0,016 | 1,485 ± 0,037 |
| | 290,40 | 3,658 ± 0,003 | 2,743 ± 0,002 | 2,409 ± 0,003 | 2,179 ± 0,011 | 1,777 ± 0,012 | 1,547 ± 0,020 | 1,470 ± 0,037 |
| | 330,00 | 3,642 ± 0,003 | 2,769 ± 0,004 | 2,421 ± 0,004 | 2,199 ± 0,013 | 1,818 ± 0,024 | 1,611 ± 0,020 | 1,508 ± 0,024 |

Tabela 7.9: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s ⁻¹) | 92,40 | 4,021 ± 0,022 | 3,024 ± 0,021 | 2,675 ± 0,014 | 2,447 ± 0,022 | 2,023 ± 0,016 | 1,671 ± 0,019 | 1,425 ± 0,015 |
| | 132,00 | 3,943 ± 0,010 | 2,927 ± 0,007 | 2,577 ± 0,010 | 2,317 ± 0,012 | 1,906 ± 0,007 | 1,605 ± 0,007 | 1,351 ± 0,008 |
| | 171,60 | 3,963 ± 0,005 | 2,892 ± 0,006 | 2,583 ± 0,004 | 2,319 ± 0,012 | 1,853 ± 0,010 | 1,569 ± 0,005 | 1,320 ± 0,004 |
| | 211,20 | 4,032 ± 0,007 | 2,930 ± 0,005 | 2,545 ± 0,010 | 2,300 ± 0,011 | 1,895 ± 0,006 | 1,619 ± 0,004 | 1,370 ± 0,005 |
| | 250,80 | 4,042 ± 0,001 | 2,984 ± 0,006 | 2,635 ± 0,002 | 2,368 ± 0,005 | 1,861 ± 0,009 | 1,581 ± 0,006 | 1,380 ± 0,004 |
| | 290,40 | 4,053 ± 0,002 | 2,989 ± 0,003 | 2,656 ± 0,004 | 2,367 ± 0,005 | 1,900 ± 0,003 | 1,585 ± 0,005 | 1,380 ± 0,005 |
| | 330,00 | 4,019 ± 0,047 | 3,005 ± 0,005 | 2,654 ± 0,004 | 2,374 ± 0,003 | 1,916 ± 0,002 | 1,579 ± 0,003 | 1,444 ± 0,003 |

Tabela 7.10: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s ⁻¹) | 92,40 | 4,632 ± 0,022 | 3,439 ± 0,025 | 3,096 ± 0,017 | 2,783 ± 0,016 | 2,273 ± 0,015 | 1,944 ± 0,035 | 1,667 ± 0,036 |
| | 132,00 | 4,613 ± 0,005 | 3,352 ± 0,005 | 2,950 ± 0,006 | 2,663 ± 0,018 | 2,141 ± 0,008 | 1,818 ± 0,015 | 1,562 ± 0,021 |
| | 171,60 | 4,699 ± 0,004 | 3,336 ± 0,004 | 2,928 ± 0,006 | 2,641 ± 0,025 | 2,159 ± 0,007 | 1,786 ± 0,009 | 1,528 ± 0,007 |
| | 211,20 | 4,670 ± 0,006 | 3,419 ± 0,004 | 3,001 ± 0,012 | 2,623 ± 0,015 | 2,068 ± 0,005 | 1,852 ± 0,008 | 1,616 ± 0,016 |
| | 250,80 | 4,650 ± 0,003 | 3,401 ± 0,003 | 3,018 ± 0,004 | 2,734 ± 0,014 | 2,154 ± 0,007 | 1,736 ± 0,009 | 1,640 ± 0,012 |
| | 290,40 | 4,663 ± 7E-16 | 3,400 ± 0,004 | 2,992 ± 0,003 | 2,679 ± 0,006 | 2,200 ± 0,009 | 1,820 ± 0,005 | 1,610 ± 0,017 |
| | 330,00 | 4,669 ± 0,002 | 3,399 ± 0,007 | 2,990 ± 0,003 | 2,662 ± 0,010 | 2,168 ± 0,004 | 1,848 ± 0,011 | 1,612 ± 0,011 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.11: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,947 ± 0,020 | 3,671 ± 0,019 | 3,212 ± 0,017 | 2,842 ± 0,020 | 2,328 ± 0,015 | 1,965 ± 0,014 | 1,704 ± 0,019 |
| | 132,00 | 4,858 ± 0,012 | 3,602 ± 0,004 | 3,137 ± 0,006 | 2,773 ± 0,007 | 2,230 ± 0,006 | 1,876 ± 0,007 | 1,627 ± 0,006 |
| | 171,60 | 4,894 ± 0,003 | 3,550 ± 0,003 | 3,140 ± 0,003 | 2,786 ± 0,004 | 2,215 ± 0,002 | 1,825 ± 0,004 | 1,594 ± 0,005 |
| | 211,20 | 4,860 ± 0,003 | 3,551 ± 0,004 | 3,149 ± 0,000 | 2,771 ± 0,003 | 2,212 ± 0,000 | 1,815 ± 0,003 | 1,573 ± 0,002 |
| | 250,80 | 4,876 ± 0,002 | 3,579 ± 0,003 | 3,148 ± 0,003 | 2,789 ± 0,004 | 2,212 ± 0,003 | 1,834 ± 0,003 | 1,565 ± 0,003 |
| | 290,40 | 4,840 ± 1E-12 | 3,586 ± 0,001 | 3,149 ± 0,000 | 2,791 ± 0,002 | 2,248 ± 0,002 | 1,874 ± 0,003 | 1,579 ± 0,003 |
| | 330,00 | 4,841 ± 0,002 | 3,597 ± 0,002 | 3,143 ± 0,000 | 2,803 ± 0,002 | 2,252 ± 0,002 | 1,876 ± 0,002 | 1,598 ± 0,002 |

Tabela 7.12: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 6,565 ± 0,015 | 4,909 ± 0,019 | 4,337 ± 0,018 | 3,856 ± 0,021 | 3,146 ± 0,021 | 2,740 ± 0,047 | 2,995 ± 0,222 |
| | 132,00 | 6,565 ± 0,004 | 4,763 ± 0,008 | 4,173 ± 0,011 | 3,711 ± 0,009 | 2,994 ± 0,007 | 2,537 ± 0,007 | 2,281 ± 0,025 |
| | 171,60 | 6,456 ± 0,003 | 4,763 ± 0,006 | 4,138 ± 0,006 | 3,626 ± 0,006 | 2,961 ± 0,006 | 2,484 ± 0,006 | 2,292 ± 0,013 |
| | 211,20 | 6,431 ± 0,001 | 4,713 ± 0,004 | 4,161 ± 0,001 | 3,674 ± 0,005 | 3,001 ± 0,008 | 2,511 ± 0,013 | 2,408 ± 0,034 |
| | 250,80 | 6,376 ± 0,002 | 4,686 ± 0,003 | 4,120 ± 0,005 | 3,656 ± 0,005 | 2,975 ± 0,008 | 2,600 ± 0,011 | 2,352 ± 0,028 |
| | 290,40 | 6,362 ± 0,003 | 4,696 ± 0,003 | 4,106 ± 0,002 | 3,658 ± 0,009 | 2,991 ± 0,006 | 2,573 ± 0,011 | 2,288 ± 0,021 |
| | 330,00 | 6,303 ± 0,002 | 4,658 ± 0,009 | 4,110 ± 0,005 | 3,683 ± 0,008 | 3,002 ± 0,014 | 2,555 ± 0,008 | 2,301 ± 0,012 |

Tabela 7.13: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 3,672 ± 0,026 | 2,702 ± 0,019 | 2,388 ± 0,019 | 2,170 ± 0,018 | 1,755 ± 0,017 | 1,476 ± 0,012 | 1,189 ± 0,015 |
| | 132,00 | 3,574 ± 0,008 | 2,600 ± 0,011 | 2,322 ± 0,006 | 2,082 ± 0,007 | 1,667 ± 0,008 | 1,385 ± 0,007 | 1,179 ± 0,007 |
| | 171,60 | 3,632 ± 0,007 | 2,615 ± 0,006 | 2,314 ± 0,007 | 2,061 ± 0,004 | 1,633 ± 0,005 | 1,356 ± 0,005 | 1,154 ± 0,006 |
| | 211,20 | 3,707 ± 0,004 | 2,683 ± 0,003 | 2,339 ± 0,008 | 2,112 ± 0,004 | 1,706 ± 9E-17 | 1,378 ± 0,004 | 1,186 ± 0,004 |
| | 250,80 | 3,698 ± 0,003 | 2,672 ± 0,003 | 2,358 ± 0,003 | 2,093 ± 0,005 | 1,698 ± 0,004 | 1,442 ± 0,003 | 1,225 ± 0,003 |
| | 290,40 | 3,714 ± 0,003 | 2,712 ± 0,002 | 2,392 ± 0,003 | 2,098 ± 0,002 | 1,716 ± 0,005 | 1,457 ± 0,002 | 1,251 ± 0,002 |
| | 330,00 | 3,701 ± 0,003 | 2,769 ± 0,002 | 2,391 ± 0,002 | 2,134 ± 0,002 | 1,699 ± 0,002 | 1,438 ± 0,002 | 1,399 ± 0,006 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.14: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,058 ± 0,020 | 3,077 ± 0,020 | 2,699 ± 0,015 | 2,407 ± 0,018 | 1,943 ± 0,020 | 1,690 ± 0,011 | 1,440 ± 0,013 |
| | 132,00 | 3,984 ± 0,007 | 2,958 ± 0,006 | 2,593 ± 0,007 | 2,280 ± 0,005 | 1,855 ± 0,006 | 1,584 ± 0,004 | 1,363 ± 0,006 |
| | 171,60 | 3,991 ± 0,008 | 2,988 ± 0,006 | 2,568 ± 0,007 | 2,263 ± 0,007 | 1,827 ± 0,005 | 1,551 ± 0,005 | 1,337 ± 0,004 |
| | 211,20 | 4,029 ± 0,002 | 2,974 ± 0,003 | 2,621 ± 0,004 | 2,326 ± 0,003 | 1,916 ± 0,007 | 1,603 ± 0,004 | 1,383 ± 0,009 |
| | 250,80 | 4,018 ± 0,003 | 3,007 ± 0,003 | 2,648 ± 0,003 | 2,339 ± 0,005 | 1,917 ± 0,005 | 1,615 ± 0,005 | 1,422 ± 0,008 |
| | 290,40 | 4,039 ± 0,004 | 3,036 ± 0,007 | 2,656 ± 0,003 | 2,361 ± 0,006 | 1,915 ± 0,005 | 1,628 ± 0,009 | 1,432 ± 0,011 |
| | 330,00 | 4,001 ± 0,003 | 3,039 ± 0,006 | 2,662 ± 0,003 | 2,359 ± 0,003 | 1,934 ± 0,009 | 1,645 ± 0,013 | 1,432 ± 0,009 |

Tabela 7.15: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,013 ± 0,021 | 2,946 ± 0,018 | 2,563 ± 0,016 | 2,306 ± 0,018 | 1,902 ± 0,017 | 1,551 ± 0,018 | 1,327 ± 0,019 |
| | 132,00 | 3,967 ± 0,007 | 2,895 ± 0,006 | 2,519 ± 0,005 | 2,241 ± 0,005 | 1,814 ± 0,007 | 1,491 ± 0,006 | 1,296 ± 0,005 |
| | 171,60 | 4,168 ± 0,004 | 2,894 ± 0,005 | 2,525 ± 0,005 | 2,236 ± 0,005 | 1,795 ± 0,004 | 1,485 ± 0,005 | 1,279 ± 0,005 |
| | 211,20 | 4,171 ± 0,004 | 2,981 ± 5E-16 | 2,612 ± 0,003 | 2,286 ± 0,005 | 1,827 ± 0,006 | 1,531 ± 0,003 | 1,352 ± 0,006 |
| | 250,80 | 4,126 ± 0,003 | 3,024 ± 0,003 | 2,648 ± 0,003 | 2,357 ± 0,003 | 1,881 ± 0,005 | 1,564 ± 0,005 | 1,362 ± 0,003 |
| | 290,40 | 4,158 ± 0,000 | 3,081 ± 1E-12 | 2,678 ± 0,003 | 2,365 ± 0,003 | 1,924 ± 0,003 | 1,573 ± 0,003 | 1,350 ± 0,001 |
| | 330,00 | 4,147 ± 0,002 | 3,108 ± 0,001 | 2,726 ± 0,003 | 2,400 ± 0,001 | 1,900 ± 0,002 | 1,598 ± 0,002 | 1,413 ± 0,005 |

Tabela 7.16: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,135 ± 0,023 | 3,081 ± 0,023 | 2,711 ± 0,018 | 2,383 ± 0,013 | 1,944 ± 0,016 | 1,597 ± 0,021 | 1,350 ± 0,015 |
| | 132,00 | 4,056 ± 0,006 | 2,984 ± 0,007 | 2,623 ± 0,007 | 2,305 ± 0,006 | 1,859 ± 0,008 | 1,573 ± 0,007 | 1,337 ± 0,006 |
| | 171,60 | 4,113 ± 0,006 | 2,969 ± 0,005 | 2,617 ± 0,005 | 2,310 ± 0,003 | 1,844 ± 0,005 | 1,547 ± 0,003 | 1,297 ± 0,004 |
| | 211,20 | 4,161 ± 0,003 | 3,055 ± 0,001 | 2,664 ± 0,005 | 2,328 ± 0,006 | 1,867 ± 0,009 | 1,617 ± 0,005 | 1,383 ± 0,004 |
| | 250,80 | 4,172 ± 0,003 | 3,094 ± 2E-16 | 2,703 ± 0,003 | 2,384 ± 0,001 | 1,920 ± 0,004 | 1,615 ± 0,005 | 1,390 ± 0,001 |
| | 290,40 | 4,159 ± 0,002 | 3,082 ± 0,001 | 2,765 ± 0,002 | 2,401 ± 0,002 | 1,932 ± 0,003 | 1,605 ± 0,003 | 1,407 ± 0,002 |
| | 330,00 | 4,139 ± 1E-15 | 3,143 ± 9E-16 | 2,771 ± 2E-16 | 2,423 ± 2E-16 | 1,951 ± 0,002 | 1,628 ± 0,003 | 1,436 ± 0,003 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.17: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 30% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d60-100 I1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+30%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 4,799 ± 0,007 | 3,425 ± 0,029 | 2,972 ± 0,026 | 2,732 ± 0,018 | 2,252 ± 0,017 | 1,868 ± 0,027 | 1,588 ± 0,024 |
| | 132,00 | 4,736 ± 0,004 | 3,462 ± 0,008 | 2,945 ± 0,009 | 2,662 ± 0,007 | 2,151 ± 0,006 | 1,794 ± 0,008 | 1,513 ± 0,006 |
| | 171,60 | 4,780 ± 0,003 | 3,392 ± 0,004 | 2,979 ± 0,003 | 2,785 ± 0,006 | 2,303 ± 0,005 | 1,905 ± 0,009 | 1,576 ± 0,007 |
| | 211,20 | 4,747 ± 0,003 | 3,403 ± 0,004 | 3,049 ± 0,003 | 2,738 ± 0,001 | 2,253 ± 0,003 | 1,902 ± 0,005 | 1,660 ± 0,004 |
| | 250,80 | 4,757 ± 0,003 | 3,423 ± 0,002 | 3,031 ± 2E-16 | 2,692 ± 0,003 | 2,213 ± 0,002 | 1,843 ± 0,005 | 1,637 ± 0,007 |
| | 290,40 | 4,731 ± 3E-16 | 3,436 ± 5E-16 | 3,032 ± 0,003 | 2,677 ± 0,003 | 2,203 ± 0,003 | 1,862 ± 0,004 | 1,605 ± 0,004 |
| | 330,00 | 4,691 ± 1E-15 | 3,460 ± 0,002 | 3,047 ± 1E-16 | 2,698 ± 0,001 | 2,184 ± 0,001 | 1,865 ± 0,003 | 1,586 ± 0,002 |

Tabela 7.18: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d20-40 I5-15 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 9,481 ± 0,019 | 6,569 ± 0,012 | 5,545 ± 0,013 | 4,776 ± 0,021 | 3,626 ± 0,016 | 2,848 ± 0,035 | 2,368 ± 0,019 |
| | 132,00 | 9,352 ± 0,007 | 6,593 ± 0,006 | 5,528 ± 0,008 | 4,759 ± 0,006 | 3,574 ± 0,007 | 2,810 ± 0,009 | 2,291 ± 0,007 |
| | 171,60 | 9,371 ± 0,003 | 6,552 ± 4E-16 | 5,560 ± 0,002 | 4,816 ± 0,004 | 3,585 ± 0,007 | 2,814 ± 0,015 | 2,377 ± 0,013 |
| | 211,20 | 9,431 ± 0,003 | 6,524 ± 1E-15 | 5,572 ± 0,003 | 4,847 ± 0,004 | 3,635 ± 0,006 | 2,872 ± 0,013 | 2,366 ± 0,007 |
| | 250,80 | 9,431 ± 0,003 | 6,535 ± 1E-15 | 5,551 ± 0,004 | 4,797 ± 0,009 | 3,668 ± 0,006 | 2,887 ± 0,008 | 2,388 ± 0,007 |
| | 290,40 | 9,445 ± 0,005 | 6,548 ± 0,002 | 5,581 ± 0,003 | 4,817 ± 0,007 | 3,633 ± 0,009 | 2,864 ± 0,007 | 2,334 ± 0,005 |
| | 330,00 | 9,278 ± 0,138 | 6,524 ± 0,014 | 5,573 ± 0,008 | 4,842 ± 0,003 | 3,664 ± 0,006 | 2,922 ± 0,004 | 2,382 ± 0,011 |

Tabela 7.19: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d20-40 I5-15 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 10,340 ± 0,014 | 6,991 ± 0,020 | 6,003 ± 0,019 | 5,566 ± 0,156 | 4,449 ± 0,130 | 3,570 ± 0,103 | 3,026 ± 0,264 |
| | 132,00 | 10,233 ± 0,006 | 7,020 ± 0,009 | 5,943 ± 0,009 | 5,232 ± 0,038 | 3,965 ± 0,018 | 3,313 ± 0,035 | 2,566 ± 0,040 |
| | 171,60 | 10,283 ± 0,005 | 7,001 ± 0,005 | 5,993 ± 0,006 | 5,329 ± 0,015 | 4,081 ± 0,025 | 3,181 ± 0,034 | 2,731 ± 0,041 |
| | 211,20 | 10,253 ± 0,001 | 7,008 ± 0,004 | 6,013 ± 0,007 | 5,284 ± 0,017 | 4,119 ± 0,022 | 3,267 ± 0,026 | 2,848 ± 0,039 |
| | 250,80 | 10,236 ± 0,003 | 6,995 ± 0,005 | 5,993 ± 0,005 | 5,229 ± 0,012 | 4,124 ± 0,027 | 3,309 ± 0,025 | 2,810 ± 0,026 |
| | 290,40 | 10,197 ± 0,001 | 6,957 ± 0,004 | 5,978 ± 0,009 | 5,212 ± 0,015 | 4,113 ± 0,017 | 3,399 ± 0,029 | 2,862 ± 0,018 |
| | 330,00 | 10,185 ± 0,004 | 6,919 ± 0,008 | 5,988 ± 0,011 | 5,266 ± 0,011 | 4,053 ± 0,024 | 3,327 ± 0,023 | 2,779 ± 0,020 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.20: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d20-40 I5-15 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 11,972 ± 0,020 | 8,355 ± 0,014 | 7,080 ± 0,018 | 6,062 ± 0,014 | 4,613 ± 0,020 | 3,647 ± 0,015 | 3,017 ± 0,015 |
| | 132,00 | 11,814 ± 0,006 | 8,162 ± 0,007 | 6,957 ± 0,005 | 6,034 ± 0,006 | 4,485 ± 0,007 | 3,532 ± 0,007 | 2,855 ± 0,008 |
| | 171,60 | 11,744 ± 2E-15 | 8,079 ± 0,003 | 6,900 ± 0,002 | 5,984 ± 0,004 | 4,523 ± 0,004 | 3,562 ± 0,006 | 2,855 ± 0,004 |
| | 211,20 | 11,650 ± 0,004 | 8,028 ± 0,003 | 6,917 ± 0,001 | 5,962 ± 0,001 | 4,526 ± 0,004 | 3,573 ± 0,004 | 2,911 ± 0,003 |
| | 250,80 | 11,618 ± 0,001 | 7,972 ± 1E-15 | 6,851 ± 0,001 | 5,929 ± 0,003 | 4,515 ± 7E-16 | 3,618 ± 0,010 | 2,980 ± 0,007 |
| | 290,40 | 11,560 ± 0,001 | 7,989 ± 7E-16 | 6,801 ± 0,002 | 5,929 ± 0,002 | 4,568 ± 0,004 | 3,642 ± 0,008 | 2,980 ± 0,008 |
| | 330,00 | 11,524 ± 0,025 | 7,991 ± 0,001 | 6,783 ± 0,002 | 5,879 ± 3E-16 | 4,555 ± 0,002 | 3,636 ± 0,005 | 3,002 ± 0,007 |

Tabela 7.21: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d20-40 I5-15 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 17,540 ± 0,013 | 12,224 ± 0,022 | 10,661 ± 0,014 | 9,228 ± 0,013 | 6,991 ± 0,015 | 5,630 ± 0,032 | 4,940 ± 0,021 |
| | 132,00 | 16,981 ± 0,010 | 11,906 ± 0,006 | 10,358 ± 0,006 | 8,965 ± 0,005 | 6,798 ± 0,009 | 5,338 ± 0,008 | 4,674 ± 0,008 |
| | 171,60 | 16,646 ± 0,006 | 11,764 ± 0,003 | 10,220 ± 0,002 | 8,821 ± 0,004 | 6,720 ± 0,004 | 5,274 ± 0,006 | 4,681 ± 0,016 |
| | 211,20 | 16,546 ± 0,004 | 11,658 ± 0,003 | 10,090 ± 0,003 | 8,635 ± 0,003 | 6,617 ± 7E-16 | 5,264 ± 0,009 | 4,787 ± 0,014 |
| | 250,80 | 16,390 ± 0,004 | 11,568 ± 0,004 | 9,977 ± 0,001 | 8,535 ± 0,003 | 6,602 ± 0,003 | 5,312 ± 0,004 | 4,880 ± 0,017 |
| | 290,40 | 14,997 ± 2E-15 | 11,521 ± 0,001 | 9,926 ± 0,001 | 8,493 ± 0,001 | 6,588 ± 0,002 | 5,332 ± 0,002 | 4,984 ± 0,019 |
| | 330,00 | 13,197 ± 2E-15 | 11,455 ± 0,002 | 9,873 ± 0,001 | 8,465 ± 0,002 | 6,538 ± 0,001 | 5,409 ± 0,003 | 5,139 ± 0,009 |

Tabela 7.22: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L5-15 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d20-40 I5-15 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 32,952 ± 0,379 | 18,276 ± 0,103 | 14,930 ± 0,077 | 12,859 ± 0,104 | 10,469 ± 0,126 | 9,285 ± 0,132 | 9,177 ± 0,120 |
| | 132,00 | 28,956 ± 0,199 | 17,747 ± 0,007 | 14,478 ± 0,005 | 12,601 ± 0,008 | 10,337 ± 0,017 | 9,117 ± 0,013 | 8,796 ± 0,020 |
| | 171,60 | 25,379 ± 1E-12 | 16,995 ± 0,039 | 13,902 ± 0,022 | 12,127 ± 0,014 | 9,945 ± 0,004 | 8,824 ± 0,006 | 8,442 ± 0,009 |
| | 211,20 | 20,621 ± 1E-15 | 16,215 ± 0,033 | 13,338 ± 0,022 | 11,672 ± 0,017 | 9,602 ± 0,005 | 8,504 ± 0,004 | 8,244 ± 0,014 |
| | 250,80 | 17,365 ± 1E-15 | 15,545 ± 0,036 | 12,874 ± 0,019 | 11,285 ± 0,018 | 9,276 ± 0,006 | 8,240 ± 0,002 | 8,174 ± 0,029 |
| | 290,40 | 14,997 ± 2E-15 | 14,992 ± 0,004 | 12,509 ± 0,013 | 10,987 ± 0,015 | 8,999 ± 0,006 | 8,019 ± 0,001 | 8,170 ± 0,012 |
| | 330,00 | 13,197 ± 2E-15 | 13,197 ± 2E-15 | 12,206 ± 0,008 | 10,706 ± 0,014 | 8,779 ± 0,005 | 7,807 ± 0,002 | 8,087 ± 0,010 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.23: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 8,900 ± 0,021 | 6,166 ± 0,024 | 5,273 ± 0,018 | 4,574 ± 0,022 | 3,536 ± 0,014 | 2,824 ± 0,034 | 2,308 ± 0,021 |
| | 132,00 | 8,875 ± 0,006 | 6,184 ± 0,009 | 5,312 ± 0,019 | 4,497 ± 0,005 | 3,477 ± 0,010 | 2,776 ± 0,023 | 2,240 ± 0,008 |
| | 171,60 | 8,853 ± 0,006 | 6,187 ± 0,004 | 5,276 ± 0,007 | 4,563 ± 0,011 | 3,536 ± 0,018 | 2,748 ± 0,012 | 2,254 ± 0,010 |
| | 211,20 | 8,899 ± 0,015 | 6,237 ± 0,005 | 5,295 ± 0,011 | 4,626 ± 0,036 | 3,557 ± 0,022 | 2,805 ± 0,012 | 2,339 ± 0,015 |
| | 250,80 | 8,867 ± 0,008 | 6,257 ± 0,004 | 5,317 ± 0,008 | 4,589 ± 0,004 | 3,526 ± 0,007 | 2,827 ± 0,010 | 2,324 ± 0,005 |
| | 290,40 | 8,848 ± 0,004 | 6,207 ± 0,002 | 5,311 ± 0,009 | 4,614 ± 0,013 | 3,526 ± 0,011 | 2,829 ± 0,009 | 2,310 ± 0,008 |
| | 330,00 | 8,877 ± 0,008 | 6,176 ± 0,006 | 5,322 ± 0,006 | 4,642 ± 0,012 | 3,582 ± 0,012 | 2,869 ± 0,009 | 2,416 ± 0,013 |

Tabela 7.24: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 9,122 ± 0,015 | 6,127 ± 0,010 | 5,146 ± 0,021 | 4,377 ± 0,017 | 3,241 ± 0,022 | 2,499 ± 0,021 | 2,048 ± 0,026 |
| | 132,00 | 9,191 ± 0,006 | 6,338 ± 0,006 | 5,382 ± 0,007 | 4,499 ± 0,011 | 3,324 ± 0,008 | 2,549 ± 0,008 | 2,044 ± 0,009 |
| | 171,60 | 9,300 ± 0,004 | 6,392 ± 0,002 | 5,445 ± 7E-16 | 4,690 ± 0,004 | 3,483 ± 0,010 | 2,641 ± 0,006 | 2,194 ± 0,004 |
| | 211,20 | 9,402 ± 0,004 | 6,449 ± 0,000 | 5,503 ± 0,004 | 4,757 ± 0,003 | 3,544 ± 0,001 | 2,776 ± 0,005 | 2,231 ± 0,008 |
| | 250,80 | 9,378 ± 0,004 | 6,431 ± 0,003 | 5,532 ± 0,004 | 4,783 ± 0,001 | 3,600 ± 0,001 | 2,802 ± 0,006 | 2,275 ± 0,008 |
| | 290,40 | 9,392 ± 0,002 | 6,455 ± 0,003 | 5,551 ± 0,002 | 4,811 ± 0,002 | 3,628 ± 0,002 | 2,858 ± 0,003 | 2,277 ± 0,008 |
| | 330,00 | 9,307 ± 0,076 | 6,467 ± 0,002 | 5,524 ± 0,003 | 4,811 ± 0,001 | 3,637 ± 0,002 | 2,879 ± 0,010 | 2,343 ± 0,007 |

Tabela 7.25: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 10,703 ± 0,040 | 7,438 ± 0,017 | 6,299 ± 0,015 | 5,433 ± 0,018 | 4,398 ± 0,113 | 3,712 ± 0,141 | 2,862 ± 0,096 |
| | 132,00 | 10,717 ± 0,006 | 7,398 ± 0,006 | 6,376 ± 0,026 | 5,435 ± 0,007 | 4,148 ± 0,020 | 3,446 ± 0,059 | 2,728 ± 0,039 |
| | 171,60 | 10,742 ± 0,005 | 7,357 ± 0,003 | 6,365 ± 0,015 | 5,460 ± 0,008 | 4,124 ± 0,016 | 3,319 ± 0,023 | 2,753 ± 0,031 |
| | 211,20 | 10,689 ± 0,003 | 7,310 ± 0,001 | 6,302 ± 0,009 | 5,494 ± 0,016 | 4,198 ± 0,021 | 3,441 ± 0,021 | 2,754 ± 0,020 |
| | 250,80 | 10,626 ± 0,007 | 7,272 ± 0,007 | 6,248 ± 0,011 | 5,447 ± 0,015 | 4,252 ± 0,025 | 3,396 ± 0,030 | 2,822 ± 0,025 |
| | 290,40 | 10,574 ± 0,003 | 7,233 ± 0,008 | 6,262 ± 0,009 | 5,475 ± 0,014 | 4,278 ± 0,021 | 3,440 ± 0,019 | 2,864 ± 0,032 |
| | 330,00 | 10,586 ± 0,003 | 7,223 ± 0,004 | 6,197 ± 0,009 | 5,434 ± 0,015 | 4,367 ± 0,027 | 3,504 ± 0,022 | 2,873 ± 0,017 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.26: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 11,298 ± 0,024 | 7,981 ± 0,017 | 6,711 ± 0,024 | 5,805 ± 0,029 | 4,398 ± 0,024 | 3,432 ± 0,021 | 2,828 ± 0,034 |
| | 132,00 | 11,239 ± 0,034 | 7,872 ± 0,007 | 6,739 ± 0,017 | 5,817 ± 0,016 | 4,344 ± 0,014 | 3,391 ± 0,007 | 2,743 ± 0,017 |
| | 171,60 | 11,262 ± 0,004 | 7,841 ± 0,003 | 6,688 ± 0,010 | 5,788 ± 0,019 | 4,412 ± 0,013 | 3,474 ± 0,007 | 2,775 ± 0,020 |
| | 211,20 | 11,249 ± 0,003 | 7,766 ± 0,004 | 6,710 ± 0,014 | 5,781 ± 0,018 | 4,391 ± 0,015 | 3,544 ± 0,018 | 2,879 ± 0,008 |
| | 250,80 | 11,215 ± 0,003 | 7,683 ± 0,004 | 6,634 ± 0,018 | 5,716 ± 0,033 | 4,355 ± 0,018 | 3,498 ± 0,011 | 2,854 ± 0,012 |
| | 290,40 | 11,163 ± 0,002 | 7,683 ± 0,004 | 6,593 ± 0,008 | 5,712 ± 0,015 | 4,396 ± 0,008 | 3,553 ± 0,008 | 2,862 ± 0,010 |
| | 330,00 | 11,126 ± 0,006 | 7,705 ± 0,004 | 6,539 ± 0,013 | 5,712 ± 0,014 | 4,406 ± 0,011 | 3,488 ± 0,014 | 2,854 ± 0,016 |

Tabela 7.27: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D20-40 L10-30 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d20-40 l10-30 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 14,537 ± 0,027 | 9,905 ± 0,029 | 8,387 ± 0,029 | 7,133 ± 0,038 | 5,259 ± 0,039 | 4,084 ± 0,073 | 3,252 ± 0,027 |
| | 132,00 | 14,502 ± 0,007 | 9,977 ± 0,008 | 8,411 ± 0,025 | 7,252 ± 0,020 | 5,387 ± 0,021 | 4,125 ± 0,010 | 3,307 ± 0,024 |
| | 171,60 | 14,479 ± 0,006 | 9,995 ± 0,004 | 8,402 ± 0,027 | 7,259 ± 0,024 | 5,463 ± 0,021 | 4,263 ± 0,023 | 3,458 ± 0,021 |
| | 211,20 | 14,384 ± 0,009 | 10,000 ± 0,006 | 8,311 ± 0,044 | 7,275 ± 0,030 | 5,499 ± 0,023 | 4,229 ± 0,027 | 3,589 ± 0,014 |
| | 250,80 | 14,328 ± 0,006 | 9,932 ± 0,016 | 8,337 ± 0,026 | 7,259 ± 0,023 | 5,525 ± 0,020 | 4,319 ± 0,015 | 3,595 ± 0,029 |
| | 290,40 | 14,256 ± 0,010 | 9,926 ± 0,020 | 8,367 ± 0,030 | 7,230 ± 0,021 | 5,560 ± 0,018 | 4,330 ± 0,034 | 3,698 ± 0,019 |
| | 330,00 | 13,197 ± 2E-15 | 9,891 ± 0,008 | 8,326 ± 0,040 | 7,200 ± 0,019 | 5,545 ± 0,013 | 4,360 ± 0,024 | 3,808 ± 0,020 |

Tabela 7.28: Resultado das medições e respetivos erros para 0,25%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,25%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 9,538 ± 0,023 | 6,576 ± 0,019 | 5,591 ± 0,022 | 4,800 ± 0,018 | 3,598 ± 0,018 | 2,859 ± 0,019 | 2,391 ± 0,014 |
| | 132,00 | 9,398 ± 0,007 | 6,517 ± 0,007 | 5,603 ± 0,006 | 4,793 ± 0,008 | 3,549 ± 0,005 | 2,779 ± 0,009 | 2,262 ± 0,006 |
| | 171,60 | 9,517 ± 0,004 | 6,529 ± 0,002 | 5,608 ± 0,003 | 4,822 ± 7E-16 | 3,625 ± 0,003 | 2,819 ± 0,005 | 2,240 ± 0,003 |
| | 211,20 | 9,517 ± 0,003 | 6,578 ± 0,004 | 5,643 ± 0,001 | 4,849 ± 0,003 | 3,618 ± 9E-16 | 2,867 ± 0,002 | 2,306 ± 0,002 |
| | 250,80 | 9,471 ± 0,002 | 6,578 ± 0,003 | 5,651 ± 1E-15 | 4,846 ± 0,001 | 3,675 ± 0,002 | 2,864 ± 0,003 | 2,324 ± 0,003 |
| | 290,40 | 9,475 ± 1E-15 | 6,556 ± 0,002 | 5,632 ± 0,004 | 4,885 ± 0,003 | 3,681 ± 0,001 | 2,904 ± 1E-12 | 2,345 ± 1E-12 |
| | 330,00 | 9,430 ± 0,002 | 6,541 ± 0,002 | 5,614 ± 0,001 | 4,882 ± 0,001 | 3,731 ± 9E-16 | 2,927 ± 1E-12 | 2,359 ± 0,002 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.29: Resultado das medições e respetivos erros para 0,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,50%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 10,123 ± 0,028 | 6,669 ± 0,020 | 5,638 ± 0,019 | 4,824 ± 0,017 | 3,656 ± 0,015 | 3,184 ± 0,110 | 2,414 ± 0,027 |
| | 132,00 | 10,018 ± 3E-15 | 6,636 ± 0,005 | 5,670 ± 0,002 | 4,859 ± 0,004 | 3,747 ± 0,026 | 2,894 ± 0,015 | 2,289 ± 0,027 |
| | 171,60 | 10,024 ± 0,006 | 6,642 ± 0,003 | 5,681 ± 0,007 | 4,838 ± 0,004 | 3,789 ± 0,032 | 2,885 ± 0,022 | 2,475 ± 0,051 |
| | 211,20 | 10,022 ± 0,010 | 6,610 ± 0,004 | 5,667 ± 0,007 | 4,878 ± 0,005 | 3,794 ± 0,040 | 2,883 ± 0,022 | 2,483 ± 0,027 |
| | 250,80 | 10,015 ± 0,009 | 6,609 ± 0,010 | 5,655 ± 0,009 | 4,850 ± 0,004 | 3,753 ± 0,025 | 2,938 ± 0,024 | 2,478 ± 0,023 |
| | 290,40 | 10,010 ± 0,014 | 6,578 ± 0,014 | 5,668 ± 0,007 | 4,876 ± 0,020 | 3,781 ± 0,034 | 2,939 ± 0,033 | 2,455 ± 0,024 |
| | 330,00 | 10,024 ± 0,010 | 6,556 ± 0,035 | 5,635 ± 0,012 | 5,024 ± 0,026 | 3,849 ± 0,027 | 2,943 ± 0,039 | 2,595 ± 0,030 |

Tabela 7.30: Resultado das medições e respetivos erros para 0,75%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 0,75%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 10,998 ± 0,022 | 7,339 ± 0,018 | 6,256 ± 0,022 | 5,424 ± 0,029 | 4,100 ± 0,071 | 3,207 ± 0,045 | 2,765 ± 0,188 |
| | 132,00 | 10,978 ± 0,010 | 7,234 ± 0,011 | 6,228 ± 0,014 | 5,334 ± 0,018 | 4,221 ± 0,038 | 3,249 ± 0,054 | 2,533 ± 0,045 |
| | 171,60 | 10,985 ± 0,010 | 7,229 ± 0,005 | 6,210 ± 0,011 | 5,337 ± 0,038 | 4,104 ± 0,040 | 3,192 ± 0,050 | 2,588 ± 0,026 |
| | 211,20 | 11,000 ± 0,009 | 7,211 ± 0,005 | 6,266 ± 0,032 | 5,373 ± 0,025 | 4,097 ± 0,047 | 3,274 ± 0,043 | 2,608 ± 0,021 |
| | 250,80 | 11,002 ± 0,006 | 7,207 ± 0,020 | 6,277 ± 0,022 | 5,337 ± 0,035 | 4,067 ± 0,034 | 3,238 ± 0,022 | 2,629 ± 0,031 |
| | 290,40 | 10,966 ± 0,007 | 7,202 ± 0,010 | 6,259 ± 0,021 | 5,319 ± 0,026 | 4,043 ± 0,035 | 3,214 ± 0,025 | 2,641 ± 0,021 |
| | 330,00 | 10,973 ± 0,009 | 7,175 ± 0,022 | 6,223 ± 0,024 | 5,362 ± 0,034 | 4,146 ± 0,045 | 3,222 ± 0,037 | 2,663 ± 0,025 |

Tabela 7.31: Resultado das medições e respetivos erros para 1,00%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,00%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 13,637 ± 0,094 | 8,220 ± 0,033 | 7,036 ± 0,023 | 6,096 ± 0,031 | 4,549 ± 0,038 | 3,710 ± 0,024 | 3,221 ± 0,206 |
| | 132,00 | 12,804 ± 0,055 | 7,886 ± 0,022 | 6,787 ± 0,012 | 5,937 ± 0,017 | 4,480 ± 0,013 | 3,599 ± 0,036 | 2,888 ± 0,039 |
| | 171,60 | 12,283 ± 0,016 | 7,728 ± 0,002 | 6,808 ± 0,037 | 5,774 ± 0,020 | 4,365 ± 0,018 | 3,579 ± 0,024 | 2,996 ± 0,025 |
| | 211,20 | 12,076 ± 0,004 | 7,660 ± 0,004 | 6,734 ± 0,022 | 5,819 ± 0,017 | 4,304 ± 0,030 | 3,589 ± 0,030 | 2,983 ± 0,030 |
| | 250,80 | 11,927 ± 0,009 | 7,683 ± 0,014 | 6,766 ± 0,017 | 5,906 ± 0,017 | 4,451 ± 0,043 | 3,572 ± 0,049 | 3,221 ± 0,032 |
| | 290,40 | 11,819 ± 0,007 | 7,692 ± 0,024 | 6,762 ± 0,023 | 5,920 ± 0,032 | 4,565 ± 0,036 | 3,675 ± 0,029 | 3,193 ± 0,040 |
| | 330,00 | 11,786 ± 0,006 | 7,215 ± 0,166 | 6,762 ± 0,018 | 5,952 ± 0,023 | 4,549 ± 0,038 | 3,696 ± 0,025 | 3,211 ± 0,036 |

Modelos Reológicos de Nanofluidos

Tabela 7.32: Resultado das medições e respetivos erros para 1,50%vol de nanotubos de carbono de dimensão D60-100 L1-2 dispersos numa solução aquosa de 60% de EG.

| 1,50%vol MWCNTs | | d60-100 l1-2 | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fluido Base | | AD+60%EG | | | | | | |
| Temperatura | | 283,15K | 293,15K | 298,15K | 303,15K | 313,15K | 323,15K | 333,15K |
| Taxa de Corte (s^{-1}) | 92,40 | 15,205 ± 0,065 | 10,298 ± 0,054 | 9,388 ± 0,082 | 8,459 ± 0,106 | 6,727 ± 0,112 | 5,321 ± 0,079 | 4,385 ± 0,034 |
| | 132,00 | 14,575 ± 0,007 | 9,949 ± 0,014 | 8,605 ± 0,010 | 7,641 ± 0,009 | 5,876 ± 0,013 | 4,729 ± 0,006 | 4,013 ± 0,005 |
| | 171,60 | 14,379 ± 0,035 | 9,692 ± 0,008 | 8,383 ± 0,005 | 7,352 ± 0,005 | 5,606 ± 0,002 | 4,567 ± 0,003 | 3,840 ± 0,004 |
| | 211,20 | 14,173 ± 0,009 | 9,528 ± 0,005 | 8,250 ± 0,004 | 7,293 ± 0,006 | 5,552 ± 0,004 | 4,453 ± 0,005 | 3,784 ± 0,004 |
| | 250,80 | 13,719 ± 0,025 | 9,569 ± 0,029 | 8,121 ± 0,009 | 7,300 ± 0,017 | 5,527 ± 0,004 | 4,420 ± 7E-16 | 3,825 ± 0,003 |
| | 290,40 | 13,298 ± 0,010 | 9,593 ± 0,004 | 8,132 ± 0,011 | 7,313 ± 0,014 | 5,557 ± 0,005 | 4,390 ± 0,001 | 3,790 ± 9E-16 |
| | 330,00 | 13,007 ± 0,019 | 9,543 ± 0,002 | 8,196 ± 0,014 | 7,370 ± 0,021 | 5,580 ± 0,006 | 4,413 ± 0,004 | 3,772 ± 0,002 |