



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Pedro Cardoso Moça

**Estudo experimental e numérico da
transferência de calor de nanofluidos**

Tese de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)

Professor Doutor Rui Alberto Madeira Macedo de Lima

Professor Doutor João Mário Rodrigues Miranda

Novembro 2019

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Não Comercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Durante este percurso, embora muitas vezes caminhando sozinho, contei com a confiança e suporte de diversas pessoas, sem as quais este trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Rui Alberto Lima e ao Professor João Mário Miranda, orientadores desta dissertação, agradeço todo o apoio técnico, científico e toda a sua boa disposição.

À equipa de funcionários dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica, com especial atenção ao Eng. Filipe Marques ao Eng. Carlos Alberto e à Eng^a Vera Faustino, que contribuíram para a inovação e realização de ensaios.

À Universidade do Minho, pela disponibilização de recursos fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega Diogo Lopes, pela sua disponibilidade na transmissão de conhecimentos referentes ao *software* de simulação numérica COMSOL.

A todos os meus amigos e colegas, com especial atenção ao João Silva, pelo seu apoio incansável nesta caminhada.

À minha namorada Ana Sofia, cujo apoio se demonstrou sem igual.

Aos meus queridos pais, um agradecer imenso, por todo o suporte e apoio inigualável nesta caminhada que foi a minha formação académica. Sem eles e sem a sua motivação, não teria sido possível atingir os meus objetivos, exigindo sempre o melhor de mim.

Gostaria também de agradecer o suporte financeiro, para a aquisição de consumíveis, dos seguintes projetos: UID/EMS/04077/2019, UID/EMS/00532/2019, NORTE-01-0145-FEDER-030171 e UTAP-EXPL/CTE/0064/2017.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Tendo em vista que as recentes tecnologias visam uma redução no tamanho dos equipamentos, assim como aumentos nas suas performances, para que a sua integridade não se comprometa, surge a necessidade de desenvolvimento de processos de arrefecimento mais sofisticados. É neste cenário que o presente trabalho se enquadra, uma vez que visa o estudo dos nanofluidos e a sua utilização como substituto da água ou outros fluidos em processos de arrefecimento.

Este trabalho apresenta ensaios experimentais de água e de nanofluidos, simulações numéricas e um estudo da determinação da condutividade térmica de nanofluidos.

Relativamente aos ensaios experimentais, estes, foram elaborados utilizando um tubo oco de uma liga de alumínio, sendo que foi necessário proceder a algumas alterações para realizar os ensaios experimentais. Com este tubo, realizaram-se testes a dois fluidos diferentes: água destilada e um nanofluido de óxidos de ferro com uma concentração de 0.2%. Para estes ensaios, utilizaram-se três temperaturas da fonte quente por forma a averiguar a influência da temperatura na transferência de calor. Em termos gerais, verificou-se um ligeiro aumento da transferência de calor relativamente ao nanofluido utilizado em comparação com a água.

Em relação às simulações numéricas, estas realizaram-se no sentido de comprovar a coerência dos resultados obtidos experimentalmente com água. Os resultados obtidos numericamente, ainda que superiores, revelam coerência com os experimentais.

Tendo em conta à falta de consenso relativa à condutividade térmica dos nanofluidos, torna-se imprescindível a existência de um método experimental coerente para sua determinação. Neste contexto foram testados vários métodos para a determinação da condutividade térmica de nanofluidos. O método capaz de medir esta propriedade foi o *Hot-Disk Transient Plane Source*. Apesar dos resultados terem sido interessantes, torna-se necessário a realização de mais ensaios experimentais com o intuito de avaliar o potencial deste método para medir a condutividade térmica de nanofluidos.

PALAVRAS-CHAVE

Nanofluidos, Condutividade Térmica, Transferência de Calor, Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

ABSTRACT

In the view that recent technologies aim to a reduction in the size of the equipment, as well as enhancements in their performances, in order to not compromise their integrity, it comes the need to develop more sophisticated cooling processes. This work fits in this view, once it aims at the study of nanofluids and their use replacing water or other kind of fluids in cooling processes.

This work presents experimental tests using water and nanofluids, numerical simulations and a study regarding the determination of the thermal conductivity of nanofluids.

Regarding the experimental tests, these were elaborated by using a hollow tube of an aluminium alloy, although it was necessary to do a few changes in order to run the experimental tests. With this tube, two fluids were tested: distilled water and a nanofluid of iron oxides with a concentration of 0,2%. In order to ascertain the influence of the temperature in the heat transfer, the heat source was used at three different temperatures. Broadly speaking, a slight enhancement in the heat transfer using the nanofluid in comparison with water was verified.

Regarding the numerical simulations, these were done so that the experimental data using water could be verified. The numerical results, even though bigger, revealed coherence with the experimental ones.

Given the lack of consensus regarding the thermal conductivity of nanofluids, it is indispensable the existence of a coherent method capable of determining it. In this contest it was tested several methods regarding the determination of the nanofluids thermal conductivity. The method capable of measure this property as the Hot-Disk Transient Plane Source. Although the results were interesting, it is necessary the realization of mores experimental tests aiming to evaluate this method's potential to measure the thermal conductivity of nanofluids.

KEYWORDS

Nanofluids, Thermal Conductivity, Heat Transfer, Convection Heat Transfer Coefficient

ÍNDICE

| | |
|---|-------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo..... | v |
| Abstract | vii |
| Índice | ix |
| Índice de Figuras..... | xiii |
| Índice de Tabelas..... | xxi |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos..... | xxiii |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Estrutura da dissertação..... | 2 |
| 1.2 Transferência de calor | 3 |
| 1.2.1 Condução..... | 4 |
| 1.2.2 Radiação | 5 |
| 1.2.3 Convecção | 6 |
| 2. Estado da Arte dos nanofluidos | 11 |
| 2.1 Nanofluidos: vantagens e aplicações | 17 |
| 2.1.1 Principais vantagens..... | 18 |
| 2.1.2 Algumas aplicações | 18 |
| 2.2 Propriedades Termofísicas | 24 |
| 2.2.1 Condutividade térmica..... | 25 |
| 2.2.2 Viscosidade..... | 29 |
| 2.2.3 Calor Específico | 33 |
| 2.2.4 Massa Volúmica, massa específica ou densidade absoluta..... | 34 |
| 2.3 Meios de incremento da condutividade térmica | 35 |
| 2.3.1 Movimento Browniano | 35 |
| 2.3.2 Aglomeração das nanopartículas..... | 36 |
| 2.3.3 Natureza de transporte nas nanopartículas | 37 |
| 2.3.4 Estratificação interface liquido-sólido..... | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.5 | Parâmetros que influenciam os mecanismos | 38 |
| 2.4 | Estabilidade e dispersão dos nanofluidos | 46 |
| 2.4.1 | Ultrassons | 47 |
| 2.4.2 | Microestrutura | 49 |
| 2.4.3 | Tamanho dos aglomerados | 56 |
| 2.4.4 | Potencial Zeta | 57 |
| 2.4.5 | Surfactante | 58 |
| 2.5 | Desafios | 59 |
| 3. | Produção de nanopartículas | 65 |
| 3.1 | Protocolo para síntese de nanopartículas de Fe_3O_4 | 65 |
| 4. | Estudo da transferência de calor com a utilização de nanofluidos | 69 |
| 4.1 | Análise Teórica ao Coeficiente de Transferência de calor por Convecção | 71 |
| 4.2 | Análise Experimental ao Coeficiente de Transferência de calor por Convecção | 73 |
| 4.2.1 | Fluidos utilizados | 74 |
| 4.2.2 | Milicanal utilizado neste estudo | 74 |
| 4.2.3 | Materiais e equipamentos utilizados | 76 |
| 4.2.4 | Parâmetros a determinar | 78 |
| 4.2.5 | Tratamento analítico | 79 |
| 5. | Simulação Numérica – COMSOL | 81 |
| 5.1 | Escoamento do fluido em regime laminar | 82 |
| 5.1.1 | Modelo numérico | 82 |
| 5.1.2 | Geometria e Malha | 83 |
| 5.1.3 | Materiais..... | 84 |
| 5.1.4 | Condições de fronteira | 84 |
| 5.2 | Transferência de calor | 85 |
| 5.2.1 | Modelo numérico | 86 |
| 5.2.2 | Geometria e malha..... | 87 |
| 5.2.3 | Materiais..... | 88 |
| 5.2.4 | Condições de fronteira | 88 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6. | Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos | 91 |
| 6.1 | <i>Transient Hot-Wire</i> | 92 |
| 6.2 | <i>Thermal constants analyzer technique</i> | 93 |
| 6.2.1 | Hot Disk TPS 2500 S..... | 94 |
| 6.2.2 | Resultados obtidos | 96 |
| 6.3 | Método de medição da condutividade térmica unidirecional | 98 |
| 6.3.1 | Lei de Fourier..... | 99 |
| 6.3.2 | Equipamento | 99 |
| 6.3.3 | Equações utilizadas | 101 |
| 6.3.4 | Provetes..... | 102 |
| 6.3.5 | Ensaio experimentais..... | 103 |
| 7. | Análise e discussão dos resultados | 107 |
| 7.1 | Influência da Temperatura Ambiente | 107 |
| 7.2 | Influência das propriedades do fluido e da temperatura | 108 |
| 7.3 | Resultados Numéricos | 114 |
| 8. | Conclusões e trabalhos futuros | 123 |
| 8.1 | Conclusões..... | 123 |
| 8.2 | Trabalhos Futuros..... | 125 |
| | Referências Bibliográficas | 127 |
| | Anexo I – Convergência de malha | 137 |
| | Anexo II – Cálculo de h | 139 |
| | Anexo III – Desenhos Técnicos | 141 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. 1: Representação esquemática da transferência de calor por condução entre duas faces, com $T_1 > T_2$ | 4 |
| Figura 1. 2: Ilustração das condutividades térmica dos diferentes estados da matéria, apresentando exemplos, (Cengel Yunus 2003). | 5 |
| Figura 1. 3: Imagem ilustrativa dos meios existentes para transferência de calor (Gonzalez 2015)..... | 6 |
| Figura 1. 4: Transferência de calor de uma superfície quente para o ar através de convecção, com destaque para a formação de camadas limite de velocidade e temperatura no escoamento do fluido (Cengel Yunus 2003)..... | 7 |
| Figura 1. 5: Arrefecimento de um ovo quente por convecção forçada e natural (Cengel Yunus 2003). | 8 |
| Figura 2. 1: Número de publicações com a palavra “nanofluid” ou “nanofluids” como tópico, de acordo com a base de dados científicos, desde o ano 2000 até 2017.(Mahbubul 2019b)..... | 11 |
| Figura 2. 2: Tipo de nanopartículas e percentagem de investigadores utilizando respetivas nanopartículas em trabalhos de investigação.(Sajid e Ali 2019)..... | 14 |
| Figura 2. 3: Fluidos base utilizados por diferentes investigadores, e respetiva percentagem (Sajid e Ali 2019)..... | 15 |
| Figura 2. 4: Maiores performances obtidas por investigadores de acordo com a concentração de nanopartículas (Sajid e Ali 2019)..... | 15 |
| Figura 2. 5: Comparação da condutividade térmica de líquidos, polímeros e sólidos comuns (Saidur, Leong, e Mohammad 2011). | 17 |
| Figura 2. 6: Componentes chave de um sistema de refrigeração de um CPU (Yousefi et al. 2013). ... | 18 |
| Figura 2. 7: Ilustração esquemática do mecanismo de lubrificação utilizando nanolubrificantes (Mamat 2019)..... | 19 |
| Figura 2. 8: COP do sistema de um sistema de refrigeração , de acordo com a temperatura e concentração, utilizando um nano-refrigerante ($Al_2O_3/R-141b$) (Alawi, Salih, e Mallah 2019). | 20 |
| Figura 2. 9: Motor automóvel e respetivo radiador (Che Sidik, Witri Mohd Yazid, e Mamat 2017). ... | 21 |
| Figura 2. 10: Permutador de calor Casca e tubo (Whalley e Ebrahimi 2018). | 21 |
| Figura 2. 11: Aplicação de nanofluidos em coletores solares (Tyagi, Phelan, e Prasher 2009). | 22 |
| Figura 2. 12: Dissipadores de calor, comercialmente utilizados em dispositivos eletrónicos (Colangelo et al. 2017)..... | 23 |
| Figura 2. 13: Aplicações de maior revelo dos termossifões.(Ramezanizadeh et al. 2018) | 23 |
| Figura 2. 14: Princípio de funcionamento de um termossifão..... | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 2. 15: Complexidade associada às propriedades dos nanofluidos e aos parâmetros que as influenciam, tendo implicações na sua performance. | 25 |
| Figura 2.16: Comparação da viscosidade de acordo com a concentração, para diferentes modelos.(Mahian et al. 2013) | 31 |
| Figura 2. 17 Parâmetros que afetam a condutividade térmica do nanofluido (Mamat 2019). | 35 |
| Figura 2.18: Amostras microscópicas de um nanofluido (0.8%CNT num óleo sintético) retiradas às temperaturas de: a – Amostra congelada, -79°C; b: Temperatura ambiente; c: 100°C (Daviran et al. 2017)..... | 36 |
| Figura 2. 19: Aumento da condutividade térmica efetiva de acordo com a interface líquido/sólido gerada pela presença de uma nanopartícula. Pode-se observar o efeito que esta interface representa (P. K. Das 2017)..... | 38 |
| Figura 2. 20 Relação entre o valor do potencial zeta absoluto e a estabilidade da suspensão (Mahbubul 2019b) | 39 |
| Figura 2. 21: Efeito da interface na suspensão de nanopartículas (V. 2011)..... | 39 |
| Figura 2. 22: Efeito da temperatura na condutividade térmica, para diferentes concentrações de nanopartículas em nanofluidos (Mahbubul 2019a)..... | 40 |
| Figura 2. 23: Efeito da concentração na condutividade térmica do nanofluido, para diferentes temperaturas (Mahbubul 2019a)..... | 41 |
| Figura 2. 24: Efeito do formato das nanopartículas no aumento da condutividade térmica do nanofluido, para diferentes concentrações (Mahbubul 2019a) | 42 |
| Figura 2. 25: Efeito do tamanho das nanopartículas no aumento da condutividade térmica do nanofluido, para diferentes concentrações (Mahbubul 2019a). | 42 |
| Figura 2. 26: Método de fabrico de nanofluidos em duas fases (Subudhi e Kumar 2019) | 44 |
| Figura 2. 27: Efeito da agregação de nanopartículas na condutividade térmica (Wen et al. 2009) | 46 |
| Figura 2. 28: Exemplo de um nanofluido estável e de um nanofluido não-estável: (A) suspensão coloidal estável e dispersa, e (B) suspensão coloidal não estável e não dispersa (Mahbubul 2019c)..... | 47 |
| Figura 2. 29: Efeito da ultrassonificação em diferentes parâmetros dos nanofluidos (Mahbubul 2019c). | 49 |
| Figura 2. 30: Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado sem recurso a ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015)..... | 50 |
| Figura 2. 31: : Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado com recurso a 1h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 51 |
| Figura 2. 32 : Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado com recurso a 2 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 2. 33: Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado com recurso a 3 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 52 |
| Figura 2. 34: Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado com recurso a 4 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015) | 52 |
| Figura 2. 35 Microestrutura de um nanofluido de Al ₂ O ₃ com água preparado com recurso a 5 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015) | 53 |
| Figura 2. 36: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 0 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 54 |
| Figura 2. 37: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 1 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 54 |
| Figura 2. 38: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 2 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 54 |
| Figura 2. 39: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 3 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 55 |
| Figura 2. 40: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 4 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 55 |
| Figura 2. 41: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al ₂ O ₃ com água, preparado com 5 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015). | 55 |
| Figura 2. 42:Tamanho médio das partículas de Al ₂ O ₃ após diferentes durações de exposição a ultrassons (Mahbubul 2019c)..... | 56 |
| Figura 2. 43: Tamanho médio dos aglomerados de acordo com o tempo de ultrassonificação, para amplitudes de 25% e 50% (Mahbubul 2019c)..... | 57 |
| Figura 2. 44: Valores absolutos de potencial Zeta de acordo com o tempo a que o nanofluido foi sujeito a ultrassons (Mahbubul 2019c). | 58 |
| Figura 2. 45: Amostras de nanofluidos de Al ₂ O ₃ , sem qualquer tipo de estabilizador, nas quais é possível observar a mudança da estabilidade da suspensão com o tempo (Wen et al. 2009). | 60 |
| Figura 2. 46: Percentagem de publicações existentes, relativamente a alguns métodos experimentais utilizados para medir a condutividade térmica de nanofluidos.(Paul et al. 2010). | 63 |
| Figura 2. 47: Fe ₃ | 66 |
| Figura 2. 48: Fe ₂ | 66 |
| Figura 2. 49: Solução precipitadora de hidróxido de amónia. | 66 |
| Figura 2. 50: Solução de sais ferríticos após adição da solução precipitadora. | 66 |
| Figura 2. 51: Na figura mais da esquerda está presente apenas a solução de sais ferríticos à qual se adicionou a solução precipitadora. À sua direita, já é notória a mudança de cor, consequência da adição do hidróxido de amónia. A imagem da direita representa já a solução final contendo as nanopartículas. | |

| | |
|--|----|
| Deve-se ainda reparar que na solução final se pode ver a presença de vapores, fruto da reação ser exotérmica (Rocha 2018). | 67 |
| Figura 2. 52: Visualização da migração das nanopartículas magnéticas, durante a lavagem, pela utilização de vários ímanes. | 67 |
| Figura 2. 53: FeeO3 armazenado num tubo de ensaio (Rocha 2018). | 68 |
| Figura 3. 1: Radiador de um carro com superfície alhetada e dispositivo com canais de ventilação (Cengel Yunus 2003)..... | 69 |
| Figura 3. 2 Exemplo de um dissipador de calor com utilização de liquido (Cengel Yunus 2003) | 70 |
| Figura 3. 3: Imagem contendo tabela referente ao número de Nusselt de acordo com a geometria da secção do tubo e do tipo de transferência de calor em questão (Cengel Yunus 2003)..... | 72 |
| Figura 3. 4: Visualização da estrutura de suporte necessária para a adaptação do tubo aos ensaios experimentais a realizar. | 75 |
| Figura 3. 5: Aspeto dos preparativos para alteração ao tubo após 24h. O PDMS já se encontra solidificado. | 75 |
| Figura 3. 6: Conjunto do tubo e PDMS fora da seringa, ainda com o parafuso. | 75 |
| Figura 3. 7: Instalação utilizada no laboratório de energia e fluidos para realizar os ensaios experimentais..... | 76 |
| Figura 3. 8: Colocação do termopar à saída do tubo para medir a temperatura do outlet..... | 77 |
| Figura 3. 9: Colocação de tampa de poliuretano sobre o tubo, vista frontal..... | 77 |
| Figura 3. 10 Colocação de uma tampa de poliuretano sobre o tubo, vista de lateral. | 77 |
| Figura 3. 11: Esquema das interações de energia existentes num volume de controlo diferencial de um tubo (Cengel Yunus 2003). | 80 |
| Figura 4. 1: Perfil de velocidades de escoamento dentro de um tubo (Cengel Yunus 2003) | 85 |
| Figura 4. 2: Campo de velocidades no modelo numérico, sendo possível observar a condição de fronteira não deslizamento. Os valores da legenda encontram-se em m/s..... | 85 |
| Figura 4. 3: Vista do perfil de temperaturas pelo escoamento de fluido ao longo da tubagem. | 86 |
| Figura 4. 4: Vista da malha correspondente à secção do tubo onde se encontra o inlet. | 87 |
| Figura 5. 1: Esquema da instalação experimental do método Transient Hot-Wire (Paul et al. 2010).. | 92 |
| Figura 5. 2: Sensor, fonte plana transiente («Kapton Sensors» -)..... | 93 |
| Figura 5. 3: Esquema da instalação necessária para medição da condutividade térmica através de um medidor de constantes térmicas com recurso a uma fonte plana transiente (Sarviya e Fuskele 2017). | 94 |
| Figura 5. 4: Hot Disk TPS 2500 S, presente em Bragantia Eco Park, utilizado para medição da condutividade térmica de fluidos..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5. 5: Instalação utilizada para medição da condutividade térmica de fluido com o aparelho Hot Disk TPS 2500 S..... | 95 |
| Figura 5. 6: Instalação utilizada para medição da condutividade térmica de fluido com o aparelho Hot Disk TPS 2500 S, aquando a medição..... | 96 |
| Figura 5. 7: Gráfico correspondente aos valores da condutividade térmica obtidos de acordo com a temperatura. | 97 |
| Figura 5. 8: Gráfico correspondente aos valores da condutividade térmica obtidos à temperatura ambientem, para fluidos diferentes..... | 98 |
| Figura 5. 9: Diagrama esquemático do equipamento utilizado na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos, indicando a localização dos termopares e a direção do fluxo de calor (Lobarinhas e Eduardo Ferreira 2006)..... | 99 |
| Figura 5. 10: Esquema do equipamento utilizado na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos, com indicação da sua constituição (Lobarinhas e Eduardo Ferreira 2006) | 100 |
| Figura 5. 11: Aspeto geral da instalação utilizada na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos. Na imagem é possível observar a presença dos termopares e da placa de aquisição de dados. | 101 |
| Figura 5. 12: Parte integrante do provete oco, peça fêmea. | 103 |
| Figura 5. 13: Parte integrante do provete oco, peça macho..... | 103 |
| Figura 5. 14: Provete oco montado, ainda sem a colocação dos parafusos. | 103 |
| Figura 5. 15: Provete maciço, com os parafusos colocados..... | 103 |
| Figura 5. 16: Gráfico ilustrativo dos diferentes valores de condutividade térmica medidos no mesmo provete e com o mesmo provete em ensaios distintos. | 104 |
| Figura 6. 1: Variação da temperatura de entrada da água destilada para o ensaio com a temperatura da fonte quente programada para 55°C ($T_r = 328,15 K$)..... | 108 |
| Figura 6. 2: Variação da temperatura de entrada da água destilada para o ensaio com a temperatura da fonte quente programada para 60°C ($T_r = 333,15 K$)..... | 108 |
| Figura 6. 3: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15 K$)..... | 109 |
| Figura 6. 4: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15 K$)..... | 109 |
| Figura 6. 5: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15 K$)..... | 110 |
| Figura 6. 6: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15 K$)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6. 7: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15 K$)..... | 111 |
| Figura 6. 8: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15 K$)..... | 112 |
| Figura 6. 9: Efeito da temperatura da resistência térmica no coeficiente de transferência de calor por convecção para um caudal de 30 mL/min. | 113 |
| Figura 6. 10: Efeito da temperatura da resistência térmica na taxa de transferência de calor para um caudal de 30 mL/min..... | 113 |
| Figura 6. 11: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15 K$)..... | 114 |
| Figura 6. 12: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15 K$)..... | 115 |
| Figura 6. 13: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15 K$)..... | 115 |
| Figura 6. 14: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15 K$)..... | 116 |
| Figura 6. 15: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C..... | 116 |
| Figura 6. 16: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C..... | 117 |
| Figura 6. 17: Vista frontal da tubagem com legenda dos pontos ao longo da linha dos quais se retiraram as temperaturas até ao final da tubagem. | 118 |
| Figura 6. 18: Valores da temperatura da parede exterior inferior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha. | 119 |
| Figura 6. 19: Valores da temperatura da parede interior inferior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha. | 119 |
| Figura 6. 20: Figura 6. 21: Valores da temperatura da parede interior superior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha. | 120 |
| Figura 6. 22: Valores da temperatura da parede exterior superior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha. | 121 |
| Figura 6. 23: Figura 6. 24: Valores da temperatura no centro do tubo (correspondente ao centro do fluido) ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6. 25: Gradiente de temperaturas presente no fim da tubagem e no outlet. | 122 |
| Figura II. 1: Variação da temperatura de saída do fluido de acordo com o número de elementos constituíntes da malha. | 138 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1.1: Intervalos de valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção característicos dos diferentes tipos de convecção (Cengel Yunus 2003). | 8 |
| Tabela 2.1: Síntese de vários estudos realizados relativamente à transferência de calor com nanofluidos..... | 12 |
| Tabela 2.2: Modelos utilizados no cálculo da condutividade térmica de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores. | 28 |
| Tabela 2.3: Modelos utilizados na previsão da viscosidade de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores. | 31 |
| Tabela 2.4: Modelos utilizados na previsão do calor específico de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores..... | 33 |
| Tabela 2.5: Método de obtenção de nanofluidos utilizados por diversos investigadores. | 45 |
| Tabela 2.6: Conclusões retiradas por vários investigadores sobre o período ótimo de sujeição dos nanofluidos a ultrassons..... | 48 |
| Tabela 3.1: Dimensões do tubo utilizado nos ensaios experimentais. | 70 |
| Tabela 3.2: Propriedades termofísicas da água, das nanopartículas e do nanofluido utilizado. | 71 |
| Tabela 3.3: Regime de escoamento de acordo com o Re | 72 |
| Tabela 3.4: Correspondência entre a temperatura programada na resistência térmica e a temperatura das paredes do tubo. | 78 |
| Tabela 4.1: Valores das propriedades dos materiais utilizados na simulação numérica da transferência de calor. | 88 |
| Tabela 5.1: Valores da condutividade térmica obtidos com o provete maciço. | 104 |
| Tabela II. 1: Características das malhas utilizadas para o estudo de convergência de malha relativamente ao escoamento do fluido..... | 137 |
| Tabela II. 2: Tabela representativa da influência do número de elementos no caudal mássico médio..... | 138 |
| Tabela II. 3: Características das malhas utilizadas para o estudo de convergência de malha relativamente à transferência de calor..... | 138 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

| | | |
|-----------|--|-----------|
| A | Área | m^2 |
| Q | Calor | J |
| C_p | Calor específico | J/kg.K |
| \dot{m} | Caudal mássico | kg/s |
| \dot{V} | Caudal volúmico | m^3/s |
| D_B | Coefficiente de Difusão Browniana | - |
| h | Coefficiente de transferência de calor por convecção | $W/m^2.K$ |
| L | Comprimento | m |
| k | Condutividade térmica | $W/m.K$ |
| D | Diâmetro | m |
| D_h | Diâmetro hidráulico | m |
| a | Difusividade térmica | m^2/s |
| w | Esfericidade | - |
| n | Fator de Forma | - |
| W | Largura | m |
| m | Massa | kg |
| Nu | Número de Nusselt | - |
| Pr | Número de Prandtl | - |
| Ra | Número de Rayleigh | - |
| Re | Número de Reynolds | - |
| P | Potência | W |
| \dot{Q} | Taxa de Calor | W |
| T | Temperatura | K |
| U | Velocidade de Escoamento | m/s |
| V | Volume | m^3 |

Símbolos gregos:

| | | |
|---------------|--|---------------------------------|
| φ | Concentração | % |
| β | Coefficiente de Expansão Térmica | - |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann | W/m ² K ⁴ |
| ΔT | Diferença de temperatura | K |
| Δx | Distância/Espessura | M |
| ε | Emissividade- | - |
| δ | Espessura entre o permutador e resistência térmica | m |
| ρ | Massa específica | kg/m ³ |
| Δp | Queda de pressão | Pa |
| η | Rendimento das alhetas | % |
| μ | Viscosidade Dinâmica | Pa.s |
| ν | Viscosidade Cinemática | m ² /s |

Abreviações:

| | |
|-----|-------------------------------------|
| COP | Coeficiente de Performance |
| DEM | Departamento de Engenharia Mecânica |
| FTP | Fonte Plana Transiente |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |

1. INTRODUÇÃO

Desde há vários de anos que os processos de transferência de calor representam papéis de relevo em inúmeras atividades industriais (Mangrulkar e Kriplani 2013; Aberoumand, Aberoumand, e Javaherdeh 2013), desde sistemas de arrefecimento e aquecimento de edifícios a sistemas de arrefecimento em centrais de cogeração, não esquecendo os sistemas de ar condicionado existentes nos meios de transporte, entre outros, como é o caso de arrefecimento de microdispositivos constituídos por dispositivos eletrónicos. Para todos os casos mencionados, são utilizados fluidos convencionais, os quais carecem de condutividades térmicas elevadas, capazes de proporcionar eficientes transferências de calor. Como tal, com o objetivo de aumentar a condutividade térmica de tais fluidos convencionais, surgiu a ideia de dispersar nestes, partículas de tamanhos milimétricos ou micrométricos. No entanto, esta ideia relevou-se pouco interessante, uma vez que as partículas, dada a sua dimensão, eram propensas aos fenómenos de sedimentação, aglomeração e, por consequência, entupimento e erosão dos canais. Tomando como base este problema, decidiu-se dispersar partículas à escala nanométrica, surgindo assim a aplicação dos nanofluidos em processos de transferência de calor.

Nanofluidos, são nada mais que dispersões de partículas nanométricas com tamanhos compreendidos entre 1 e 100 nm, podendo estas serem metálicas ou não-metálicas, em fluidos convencionais. Por forma a que o nanofluido cumpra os objetivos pretendidos, ou seja, por forma a se conseguir atingir as condutividades térmicas pretendidas, estas devem possuir o tamanho correto, assim como a concentração ideal. Estes, para que a sua utilização seja otimizada e por questões de sustentabilidade e eficiência, devem ser estáveis a longo prazo, permitindo assim o seu uso numa vasta gama de aplicações (P. K. Das 2017).

Atualmente ainda existem entraves à utilização dos nanofluidos, uma vez que apesar de possuírem propriedades superiores aos fluidos convencionais, problemas com a estabilidade a longo prazo continuam a comprometer a sua aplicação do ponto de vista comercial, uma vez que com o tempo tendem a formar aglomerados de nanopartículas que por sua vez depositam-se, promovendo a erosão e entupimento dos canais por onde escoam, escasseando o interesse dos nanofluidos.

Introdução

As propriedades termofísicas dos nanofluidos dependem quer das propriedades do fluido base, quer das propriedades das nanopartículas, e existem diversos modelos segundo os quais os seus valores podem ser calculados. Não obstante, existem propriedades de maior interesse que outras quando a questão é a transferência de calor, como é o caso da condutividade térmica, do calor específico e da viscosidade. No presente trabalho, todas as propriedades serão abordadas, bem como os mecanismos capazes de proporcionar um aumento da eficiência térmica do nanofluido, revelando-se estes algo transcendentais, uma vez que dependem de vários parâmetros que também se relevam interdependentes. Deste modo, um dos objetivos deste trabalho passa por uma análise crítica à eficiência térmica dos nanofluidos pelo que surge a necessidade de avaliar a condutividade térmica dos mesmos, assim como o seu calor específico, sendo estas propriedades intrínsecas à transferência de calor. Deste modo, numa fase inicial, começou-se pela utilização de um aparelho já existente no laboratório de fluidos e energia cuja aplicação é a de medir a condutividade térmica de materiais sólidos, tentando-se uma adaptação da sua aplicação a fluidos. Adicionalmente, recorreu-se a um aparelho existente em Bragantia Eco Park, este baseando-se na lei de Fourier para a condução de calor e na técnica da fonte plana transiente, através de um sensor, é capaz de proporcionar a medição da condutividade térmica de fluidos, bem como do seu calor específico.

Neste trabalho será ainda feita uma análise teórica ao coeficiente de transferência de calor por convecção da água e de um nanofluido, por forma a verificar a viabilidade do último. Esta análise teórica será ainda fundamentada por uma análise experimental e uma análise numérica, que servirão como meio de comparação e de suporte ao cálculo teórico.

1.1 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, sendo que cada capítulo é constituído por subcapítulos com o intuito de abordar vários temas dentro do tema correspondente ao capítulo.

O Capítulo 1 foca-se na introdução do tema desta dissertação bem como no enquadramento da mesma, sendo que ainda é feita uma breve análise aos três principais mecanismos de transferência de calor existentes.

O Capítulo 2 aborda de forma mais intensa a temática dos nanofluidos, apresentando vantagens da sua utilização nas mais diversas aplicações. São apresentados os modelos

capazes de descrever as suas propriedades, os mecanismos de ganho de condutividade térmica, bem como é feita uma abordagem à sua estabilidade.

O Capítulo 3 descreve o processo de produção das nanopartículas de óxido de ferro utilizadas na elaboração do nanofluido utilizado experimentalmente.

O Capítulo 4 estuda o processo de transferência de calor por convecção, introduzindo a tubagem utilizada e a metodologia utilizada na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção.

O Capítulo 5 introduz o trabalho efetuado utilizando simulações numéricas em COMSOL *Multiphysics* enfatizando o procedimento utilizado na elaboração das simulações.

O Capítulo 6 descreve dois processos utilizados na determinação experimental da condutividade térmica de fluidos, abordando ainda a adaptação de um processo utilizado na medição da condutividade térmica de sólidos para efetuar esta mesma medição em fluidos.

O Capítulo 7 compila a avaliação e a discussão dos resultados obtidos quer nas atividades experimentais, quer nas simulações numéricas.

Por fim, o Capítulo 8 aborda as conclusões retiradas do presente trabalho, assim como várias sugestões de trabalhos futuros.

1.2 Transferência de calor

Em engenharia, o aumento da taxa a que se consegue remover calor de um dado dispositivo ou processo, é um tópico que será eternamente abordado, quer por questões ambientais, quer por questões económicas e até por questões tecnológicas. Com o avanço da tecnologia, os produtos finais seguem um percurso que os torna cada vez mais compactos e mais potentes, e por isso com maiores exigências relativamente à dissipação de calor gerado. Aqui entram na equação os nanofluidos, que pela sua elevada condutividade térmica são capazes de promover um meio eficiente para se proceder à transferência de calor.

Investigadores, têm vindo a elaborar estudos com foco no escoamento e nas características de transferência de calor de nanofluidos e, não raras vezes, revelam que através da utilização de nanofluidos é notória a existência de um incremento na transferência de calor por convecção. Assim, foi decidido realizar uma breve abordagem sobre os mecanismos de transferência de calor existentes.

Introdução

1.2.1 Condução

A transferência de calor por condução ocorre graças à existência de um gradiente térmico, o qual suscita que exista transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas, e pode ocorrer em qualquer estado físico, seja este sólido, líquido ou gasoso. No caso de um corpo sólido com faces a diferentes temperaturas, a transferência de calor por condução ocorrerá na direção da face que se encontra a temperatura mais elevada para a face a temperatura mais baixa, até que um equilíbrio de temperaturas entre as faces seja atingido. Este efeito pode ser observado na seguinte Figura 1. 1:

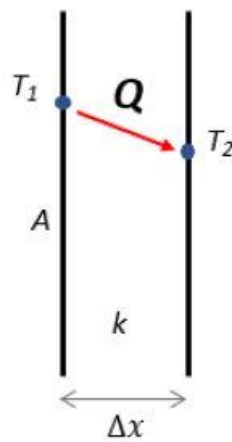


Figura 1. 1: Representação esquemática da transferência de calor por condução entre duas faces, com $T_1 > T_2$.

A taxa de calor existente neste tipo de transferência térmica, é estimada pela Lei de Fourier, que no caso de a condução de calor ser unidimensional é dada pela seguinte Equação:

$$\dot{Q} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}, \quad T_1 > T_2 \quad (1)$$

Como é possível observar, a taxa de calor, \dot{Q} , depende fortemente da condutividade térmica, k , e esta, depende exclusivamente do tipo de material em questão sendo que, regra geral, os sólidos apresentam condutividades superiores aos líquidos ou aos gases. De entre os materiais sólidos, em especial nos metais, é possível constatar que estes têm maiores condutividades quando se encontram no seu estado puro em relação aos seus derivados, como as ligas e os óxidos. Condutividades térmicas para diferentes estados de matéria, estão expostas na Figura 1. 2.

Introdução

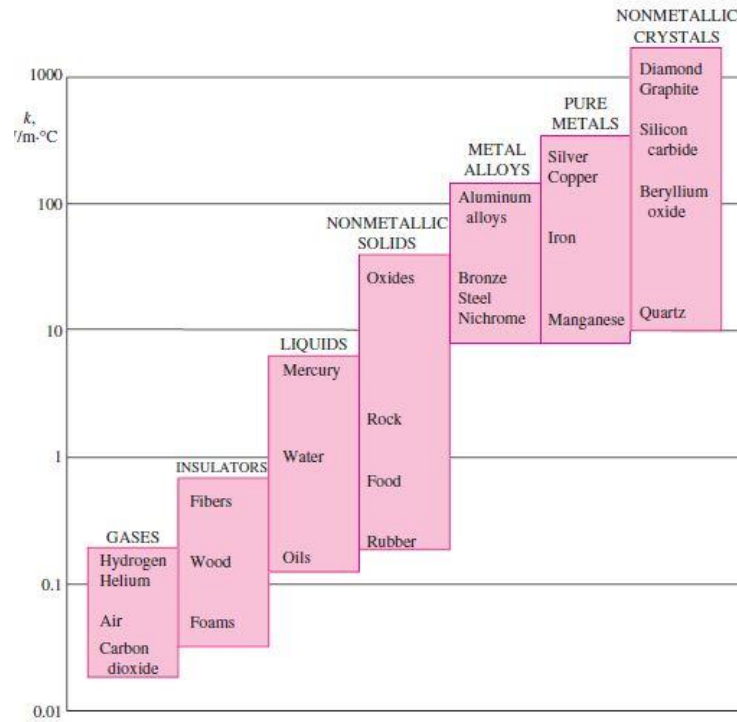


Figura 1. 2: Ilustração das condutividades térmicas dos diferentes estados da matéria, apresentando exemplos, (Cengel Yunus 2003).

1.2.2 Radiação

Radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas, ou *photons*, como resultado de mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. Contrariamente à condução e à convecção, a transferência de energia por radiação não necessita da presença de um meio para que se propague, na verdade a presença de um meio atenua o seu efeito, sendo que a transferência de energia por radiação é mais rápida (à velocidade da luz) e não sofre qualquer tipo de atenuação quando em vácuo. É deste modo que a energia do sol chega à Terra (Cengel Yunus 2003).

Uma vez que o presente estudo recai sobre transferência térmica, o interesse recai mais especificamente sobre a radiação térmica, que é a forma de radiação emitida pelos corpos quando as suas temperaturas são superiores a 0 K. Esta radiação quando atinge a superfície de um outro corpo, parte dela é absorvida, outra parte é refletida e, caso o corpo seja semitransparente, parte dessa radiação é ainda transmitida. A cada um destes efeitos está associada uma grandeza, como a absorvidade, a refletividade e a transmissividade.

Introdução

É através da Lei de Stefan-Boltzmann que é possível estimar a quantidade de calor que é emitida por uma determinada superfície de um corpo, sendo a equação correspondente a seguinte:

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon AT^4 \quad (2)$$

No presente trabalho, a energia transmitida por radiação não apresentará significativo relevo em comparação com a condução e a convecção, uma vez que se releva como um mecanismo de interesse apenas quando as temperaturas superficiais são elevadas, quando a distancia entre superfícies é considerável, ou quando os outros mecanismos de transferência de calor se revelam débeis, o que não se verifica.

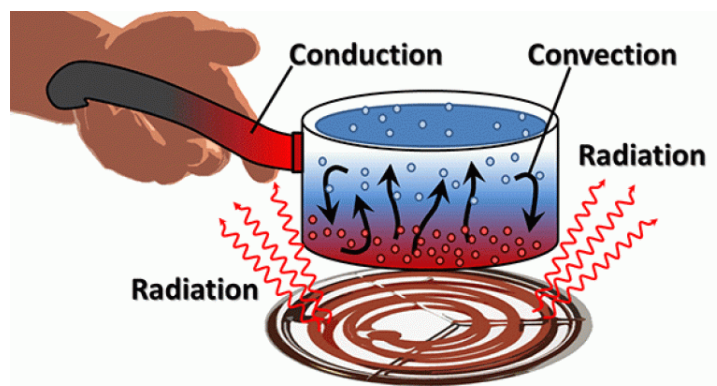


Figura 1. 3: Imagem ilustrativa dos meios existentes para transferência de calor (Gonzalez 2015).

1.2.3 Convecção

À energia transferida entre uma superfície e um fluido, líquido ou gás, em movimento e a diferentes temperaturas, atribui-se o nome de convecção. Esta transferência de calor envolve uma combinação do mecanismo de condução com o mecanismo de escoamento do fluido, que é o principal responsável pelo aumento da transferência de calor existente através do fluido, uma vez que quando maior a velocidade do fluido em questão maior será a taxa de transferência de calor. Para o caso em que o fluido se encontre com velocidade nula, a transferência de calor é mínima, e o que acontece é condução pura. O comportamento descrito pode ser observado na Figura 1. 3, na qual se pode reparar na formação de camadas limite no fluido pelo escoamento numa superfície:

Introdução

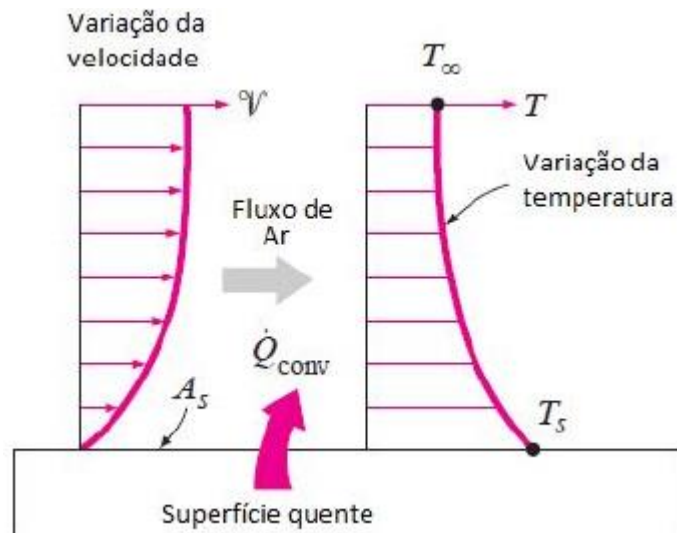


Figura 1. 4: Transferência de calor de uma superfície quente para o ar através de convecção, com destaque para a formação de camadas limite de velocidade e temperatura no escoamento do fluido (Cengel Yunus 2003).

Contrariamente à região de entrada do escoamento, onde os perfis de velocidade e de escoamento são homogêneos, na Figura 1. 4 é possível observar a caracterização de um escoamento totalmente desenvolvido térmica e hidrodinamicamente, onde os perfis de velocidade e temperatura deixam de sofrer variação. Este estado é alcançado através da ação de forças viscosas para o caso da hidrodinâmica, e pela convecção para o caso da temperatura (Cengel Yunus 2003).

Existem dois tipos de convecção, a forçada e a natural. Na convecção forçada, o fluido é forçado a escoar sobre uma superfície por meios externos, como ventoinhas, bombas ou até mesmo o próprio vento. De forma antagônica, na convecção natural, o escoamento do fluido é causado por forças de gravíticas que são induzidas pelas diferenças de densidade causadas pelo gradiente de temperatura do fluido. O fluido mais próximo da superfície é menos denso dada a sua maior temperatura promovendo a sua ascensão, posto isto, com o fluido a afastar-se da superfície quente, tende a arrefecer, tornar-se novamente mais denso e descer e, deste modo, criam-se correntes de convecção. Estes dois tipos de convecção podem ser observados da Figura 1. 5:

Introdução

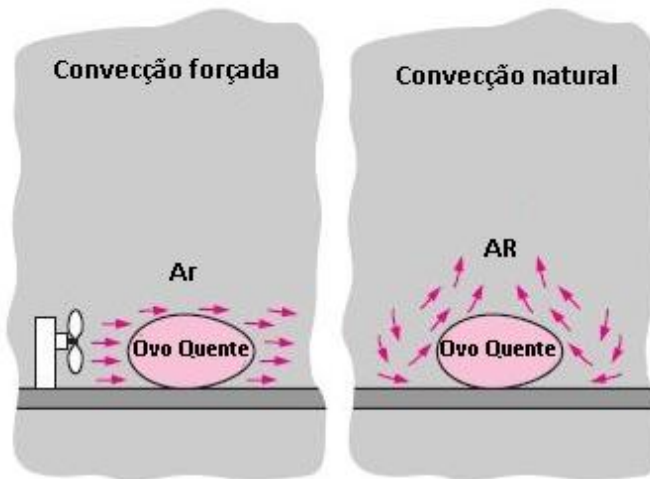


Figura 1. 5: Arrefecimento de um ovo quente por convecção forçada e natural (Cengel Yunus 2003).

A título puramente informativo, na Tabela 1.1, estão presentes alguns valores típicos de coeficientes de transferência de calor por convecção para diferentes tipos de convecção.

Tabela 1.1: Intervalos de valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção característicos dos diferentes tipos de convecção (Cengel Yunus 2003).

| Tipo de convecção | h [W/m ² °C] |
|-------------------------------|-------------------------|
| Convecção natural em gases | 2 - 25 |
| Convecção natural em líquidos | 10 – 1000 |
| Convecção forçada em gases | 25 – 250 |
| Convecção forçada em líquidos | 50 – 20000 |
| Evaporação e condensação | 2500 - 100000 |

Os processos de transferência de calor que envolvem mais do que uma fase, também se designam por convecção, uma vez que a formação de bolhas no fluido e o seu movimento resultante, apresentam um comportamento idêntico ao da convecção natural, considerando ainda a existência de uma componente relativa ao calor latente na formação das bolhas.

Apesar da complexidade característica da convecção, a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à variação da temperatura, e é determinada pela Lei de Newton para o arrefecimento sendo convenientemente expressa pela Equação (3):

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Introdução

Onde A_s é referente à área da superfície de contacto, é T_s referente à temperatura da superfície, T_∞ é referente à temperatura do fluido e h ao coeficiente de transferência de calor por convecção.

Ainda que se trate de uma expressão relativamente simples, a sua determinação é complexa, uma vez que, ao contrário da condutividade térmica que é característica exclusiva do material em questão, o coeficiente de transferência de calor por convecção não é simplesmente uma propriedade do fluido. Este parâmetro é determinado experimentalmente e o seu valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como é o caso da geometria da superfície, a natureza do escoamento do fluido e da sua velocidade e das propriedades do fluido.

2. ESTADO DA ARTE DOS NANOFLUIDOS

A dissipação de calor em inúmeros sistemas como é o caso dos dispositivos eletrônicos e dos radiadores automóveis, representa um papel vital. Devido à tendência para compactar os sistemas em termos de tamanho, de forma e de peso, os métodos até agora utilizados para remover calor são inadequados e novos métodos mais eficientes são necessários (Sajid e Ali 2019). Surgem, assim, os nanofluidos, revelando ser uma mais valia como meio de transferência de calor. Existem ainda muitas incerteza associadas aos nanofluidos, consequentemente, o número de publicações referente a estes tem vindo a aumentar, como se pode verificar na Figura 2. 1.

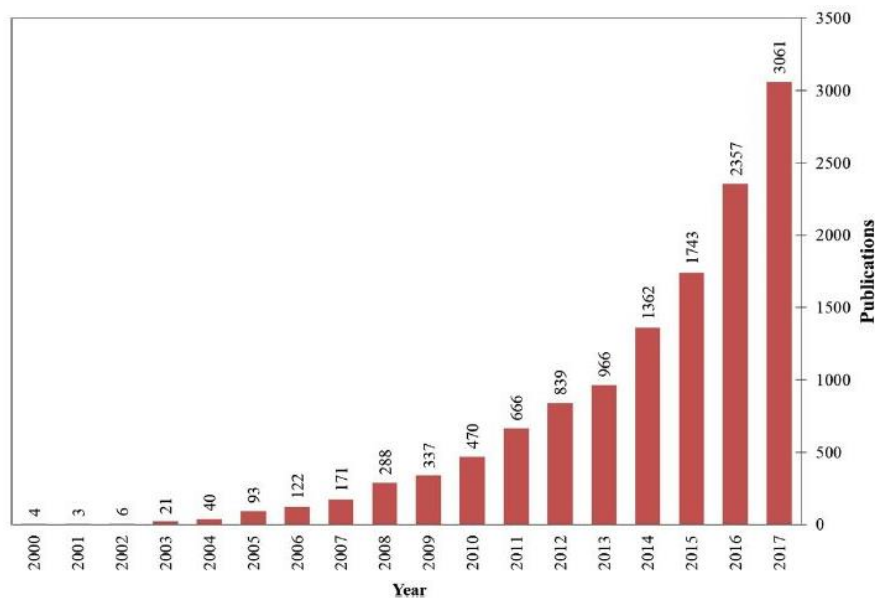


Figura 2. 1: Número de publicações com a palavra “nanofluid” ou “nanofluids” como tópico, de acordo com a base de dados científicos, desde o ano 2000 até 2017.(Mahbubul 2019b).

A dissipação de calor depende de diversos fatores e parâmetros, como é o caso do caudal de fluido utilizado, da temperatura inicial do fluido, do tipo de escoamento, da geometria do canal, entre outros. No caso dos nanofluidos, existem diversos parâmetros adicionais, como é o caso do tamanho, da forma e da concentração de nanopartículas. Na Tabela 2.1, encontra-se um resumo de alguns estudos de vários investigadores, relativos à transferência de calor com o recurso a nanofluidos.

Estado da arte dos nanofluidos

Tabela 2.1: Síntese de vários estudos realizados relativamente à transferência de calor com nanofluidos.

| Investigador | Nanopartículas | Tamanho das nanopartículas | Fluido Base | Intervalo de número de Reynolds | Intervalo de temperaturas de entrada do fluido | Tipo de escoamento | Concentração volumétrica de nanopartículas | Caudal | Resultados | Referência |
|---|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|--------------------|--|---|---|---|
| Kabban | Al ₂ O ₃ | 45 nm | Água | - | 35°C – 59°C | - | 0.25 – 0.5 % | 0.05 – 0.15 kg/s | Verificou-se um aumento de 49% na transferência de calor para uma concentração de nanopartículas de 0.5%, relativamente à água. | (Kannan et al., sem data) |
| Chougule e Sahu | TiO ₂ | 15 nm | Água | 5000 – 10000 | 80°C | Turbulento | 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 e 1 % | 90-120 l/min | Verifica-se, aproximadamente, um aumento de 40 – 50% na transferência de calor relativamente ao fluido base. | (Chougule e Sahu 2014) |
| Chavan e Pise | Al ₂ O ₃ | 20 nm | Água | 6000 – 14000 | 40°C – 80°C | Turbulento | 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 e 1 % | 3 -8 l/min | A transferência de calor vê-se aumentada entre 40% - 50% para uma concentração de 1% | (Chavan e Pise 2013) |
| Samira | CuO | 60 nm | 60% de Etilenoglicol e 40% de Água | 2000 – 8000 | 35°C, 44°C e 54°C | Turbulento | 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 e 0.8 % | 4 – 8 l/min | A queda de pressão para nanofluidos com concentrações de 0.1, 0.3 e 0.5, para o mesmo número de Reynolds, é 15%, 20% e 23%, respetivamente, superior à existente com o fluido base. | (Samira et al. 2015) |
| Ali, El-Leathy e Al.Sofyany | Al ₂ O ₃ | 10 nm | Água | - | - | Laminar | 0.1, 0.5, 1, 1.5 e 2 % | 0.000250, 0.000208 e 0.000167 m ³ /s | O aumento do número de Nusselt, no coeficiente de transferência de calor e taxa de remoção de calor foi de 9.51%, 14.72% e 14.79%, respetivamente. | (Ali, El-Leathy, e Al-Sofyany 2014) |
| Nambeesan, K.P. Vasudevan, K.P. Vasudevan, Ram Kumar, | Al ₂ O ₃ | 20nm | 80% de Etilenoglicol e 20% de Água | - | 40°C – 70°C | - | 0.1% | 0.135 kg/s | Foi conseguido um aumento de 37% na transferência de calor | (Department of Mechanical Engineering, Amrita School of Engineering Amrita VishwaVidyapeetham, Coimbatore, India et al. 2015) |

Estado da arte dos nanofluidos

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|------|----------------------------------|----------------------|--------------|---|--|--|---|--|
| Athul,Vivek, Thirumalini | | | | | | | | | | |
| Ravi Kumar | Fe ₃ O ₄ | - | Água | 15000 – 300000 | 60°C 29°C | Turbulent o | 0.005, 0.01, 0.03 e 0.06 % | Para o nanofluido: 8 – 14 l/min Para a água: 8 l/min | Verificou-se um aumento de 14.7% no número de Nusselt para uma concentração de 0.06%. | (Ravi Kumar et al. 2017) |
| Sun | Cu Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ | 50nm | Água | - | - | Turbulent o | 0.1, 0.3 e 0.5 % | - | O maior coeficiente de transferência de calor obtido foi de 2000 w/m ² k recorrendo a nanofluidos de Cu. | (Sun et al. 2016) |
| N. Kumar e Sonawane | Fe ₂ O ₃ | 22nm | Água com Etilenog licol | 1000 – 5000 | 27°C | Laminar Turbulent o | 0.01 – 0.08% | 0.5 – 3 l/min | O maior aumento no número de Nusselt verificado foi de 29% | (N. Kumar e Sonawane 2016) |
| Aghabozorg, Rashidi e Mohammadi | Fe ₂ O ₃ – CNT | 30nm | Água | 1698 3981 6070 | - | Laminar Transient e Turbulent o | 0.1 e 0.2 % (Concentração mássica) | 0.96, 2.25 e 3.43 l/min | Obteve-se um aumento de 37.5% no coeficiente de transferência de calor para um escoamento em regime turbulento. | (Aghabozorg, Rashidi, e Mohammadi 2016) |
| Mohammed, Gunnasegaran e Shuaib | TiO ₂ SiO ₂ Diamante Ag Al ₂ O ₃ CuO | | Água | 100 – 1000 | - | Laminar | 2% | 10 – 20 ml/min | Nanofluidos com nanopartículas de diamante revelaram os maiores coeficientes de transferência de calor. | (Mohammed, Gunnasegaran, e Shuaib 2011) |

Estado da arte dos nanofluidos

Da revisão bibliográfica pode-se constatar que diferentes tipos de nanopartículas têm vindo a ser utilizadas, sendo que as mais comuns são as de óxidos de alumínio e as de óxidos de titânio. Na Figura 2. 2 encontra-se reunida e esquematizada informação acerca das nanopartículas utilizadas atualmente em trabalhos de investigação.

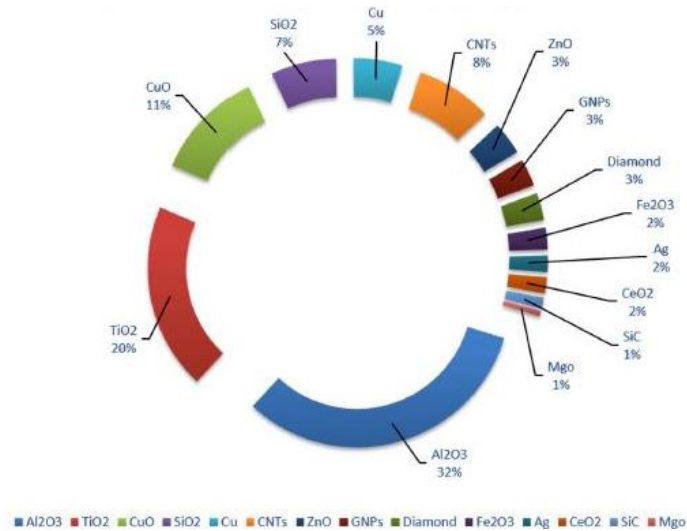


Figura 2. 2: Tipo de nanopartículas e percentagem de investigadores utilizando respetivas nanopartículas em trabalhos de investigação.(Sajid e Ali 2019).

Relativamente ao fluido base ou solvente e à concentração de nanopartículas verifica-se que o fluido base mais comum é a água e nos trabalhos de investigação revistos, investigadores têm vindo a concluir que os aumentos na transferência de calor mais significativos ocorrem para concentrações de nanopartículas inferiores a 1%, como pode ser observado na Figura 2. 3 e Figura 2. 4, respetivamente, (Sajid e Ali 2019).

Estado da arte dos nanofluidos

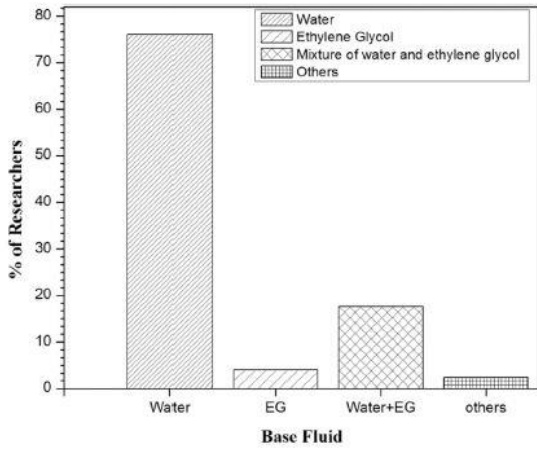


Figura 2. 3: Fluidos base utilizados por diferentes investigadores, e respetiva percentagem (Sajid e Ali 2019).

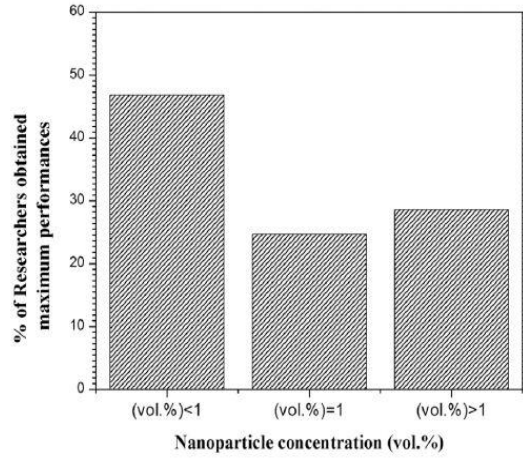


Figura 2. 4: Maiores performances obtidas por investigadores de acordo com a concentração de nanopartículas (Sajid e Ali 2019).

2.1 Nanofluidos: vantagens e aplicações

Nanofluidos são fluidos base com nanopartículas suspensas, sendo que estas apresentam tamanhos entre 1nm e 100nm. Os nanofluidos são utilizados quando soluções como convecção de ar forçada, ou a utilização de fluidos convencionais não são suficientes para o pretendido, dadas as suas baixas condutividades térmicas, pelo que a utilização de fluidos base com nanopartículas em suspensão se apresenta como uma alternativa bastante interessante. Graças à presença das nanopartículas, o fluido consegue atingir propriedades térmicas superiores, possibilitando uma maior transferência de calor ampliando, deste modo, a gama de aplicações, sendo uma das principais a remoção de calor em microdispositivos.

Com a evolução tecnológica, os dispositivos eletrónicos têm vindo a apresentar a tendência de se tornarem cada vez mais pequenos (*downsizing*) e, adicionalmente, mais potentes, pelo que o calor gerado nestes dispositivos tende a aumentar. Na impossibilidade de aumentar a área superficial dos mesmos, e na eventualidade do uso de convecção forçada não ser suficiente para manter a integridade destes dispositivos, é fulcral recorrer ao uso de fluidos térmicos. Desta maneira, surgem os nanofluidos, fluidos substitutos dos fluidos convencionais, com propriedades térmicas superiores. Não obstante, existem muitos entraves à utilização dos mesmos, nomeadamente o entupimento dos canais, a sua instabilidade a longo prazo, a falta de conhecimento teórico, a inconsistência de resultados, entre outros, que ainda os tornam, de certo modo, pouco utilizados na indústria e em aplicações comerciais.

Nesta secção será apresentada uma breve revisão bibliográfica de vários estudos e resultados obtidos sobre nanofluidos.

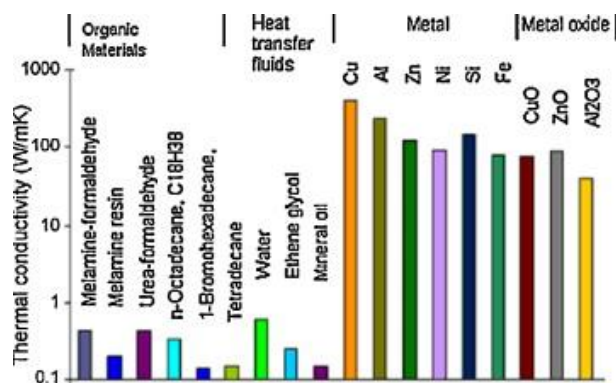


Figura 2. 5: Comparação da condutividade térmica de líquidos, polímeros e sólidos comuns (Saidur, Leong, e Mohammad 2011).

2.1.1 Principais vantagens

Sendo que os nanofluidos possuem propriedades termofísicas superiores às dos fluidos convencionais, estes caracterizam-se pela capacidade de promoverem melhor transferência de calor. Como consequência, pela utilização de nanofluidos torna-se possível em diversas aplicações, a redução da quantidade de fluido térmico utilizado, assim como a diminuição do tamanho dos permutadores e/ou dissipadores de calor utilizados. Promovendo maiores transferências de calor, possibilitam que tecnologias existentes evoluam no sentido de se tornarem mais potentes, uma vez que a dissipação de calor se vê facilitada.

2.1.2 Algumas aplicações

Os nanofluidos apresentam um grande potencial para aplicações que envolvam a transferência de calor, os mesmos são providos da capacidade de aumentar a eficiência relativa à transferência de calor, uma vez que a quantidade de energia necessária para operar os sistemas térmicos é diminuída graças às propriedades dos nanofluidos. Em seguida são apresentadas algumas aplicações dos nanofluidos:

Arrefecimento de CPU's

O sistema de arrefecimento dos CPU's inclui um evaporador e um condensador, ligados por um tubo no qual está presente o fluido refrigerante. Este tubo consiste num microcanal que varia de forma longitudinalmente, promove uma excelente transferência de calor e liga a fonte de calor ao dissipador de calor do CPU (Yousefi et al. 2013). Este sistema pode ser observado na Figura 2. 6.

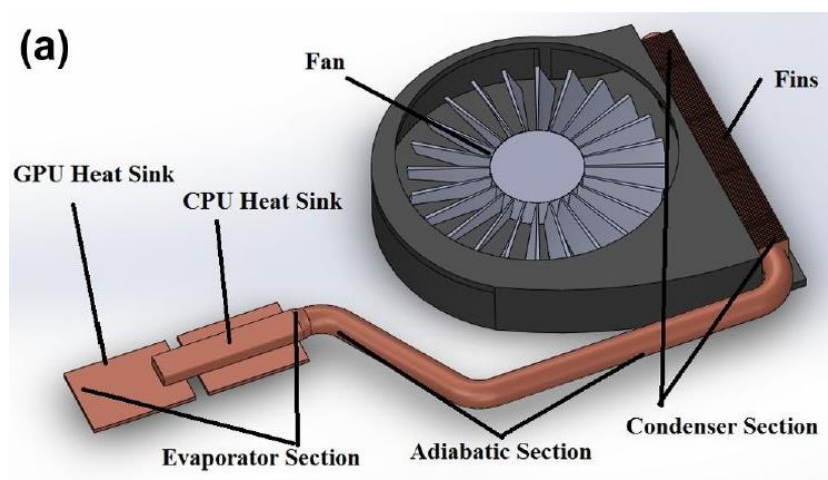


Figura 2. 6: Componentes chave de um sistema de refrigeração de um CPU (Yousefi et al. 2013).

Substituindo o fluido refrigerante por um nanofluido conseguem-se atingir melhores performances ao nível da transferência de calor, uma vez que as propriedades térmicas dos nanofluidos são superiores, pelo que existe interesse nesta substituição.

Maquinagem

Através da adição de nanopartículas aos comuns fluidos lubrificantes, consegue-se reduzir as forças necessárias para corte, melhorar a robustez das superfícies maquinadas, e prevenir a queima do componente a ser maquinado. O referido é apenas possível, devido ao facto de pela adição de nanopartículas aos lubrificantes estes apresentarem melhorias nas suas propriedades termofísicas, bem como coeficientes de fricção mais reduzidos que proporcionam um menor desgaste, aumentado a eficiência e a confiabilidade das máquinas. De um modo semelhante à maquinagem, também é possível a aplicação de nanofluidos lubrificantes em operações de laminagem. Aqui, os nanolubrificantes para além de lubrificarem a área de contacto entre os rolos e o material, retiram-lhes calor. Por outro lado, as nanopartículas existentes reduzem o coeficiente de fricção pelo facto de agirem como rolamentos Figura 2. 7.

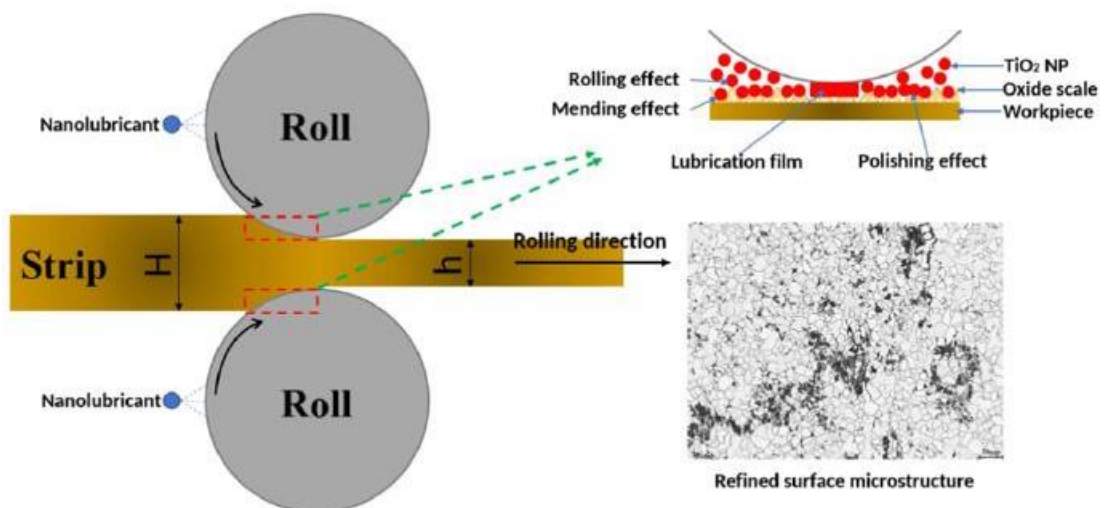


Figura 2. 7: Ilustração esquemática do mecanismo de lubrificação utilizando nanolubrificantes (Mamat 2019).

Ar-Condicionado

Nos sistemas de ar-condicionado são utilizados líquidos refrigerantes que, uma vez tendo nanopartículas dispersas, se designam por nanorefrigerantes que por sua vez, tal como o resto dos nanofluidos, revelam condutividades térmicas superiores capacitando melhores

performances na transferência de calor (W. Jiang, Ding, e Peng 2009). Estes nanorefrigerantes têm a capacidade de potenciar a taxa de transferência de calor e, por consequência, permitem tornar os sistemas de refrigeração mais compactos, pelo que o consumo energético se vê também reduzido (Mahbubul, Saidur, e Amalina 2013). Pela Figura 2. 8, observa-se que para a mesma temperatura e para o mesmo fluido refrigerante, o COP pode aumentar de aproximadamente 0.9 até 1.12 apenas pela adição de nanopartículas na percentagem de 4%.

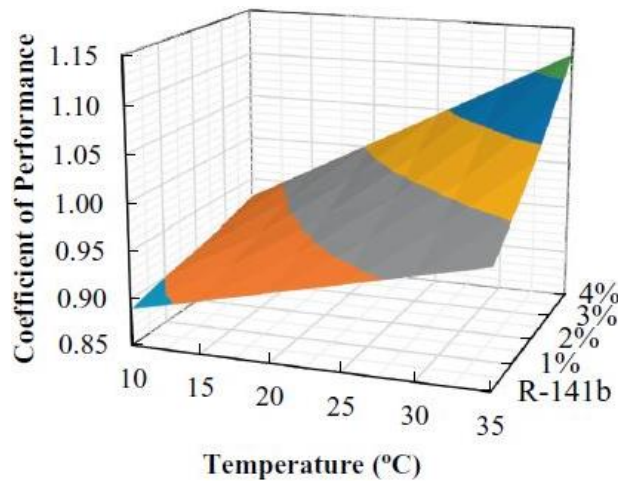


Figura 2. 8: COP do sistema de um sistema de refrigeração , de acordo com a temperatura e concentração, utilizando um nano-refrigerante (Al₂O₃/R-141b) (Alawi, Salih, e Mallah 2019).

Arrefecimento de motores

Nos sistemas de refrigeração dos veículos estão presentes radiadores, que são o componente responsável pela remoção do excesso de calor proveniente do motor por forma a garantir segurança na sua operação. Com o uso de nanofluidos nos radiadores, é expectável uma redução na queda de pressão, no entupimento dos canais de escoamento e da corrosão de outros componentes, anomalias estas que eram verificadas aquando do uso de microfluidos (Bigdeli et al. 2016). No entanto, estes fenómenos ainda se verificam para o caso dos nanofluidos, embora em menor escala, sendo que estudos recentes visam a sua diminuição até que possam ser desprezados.

Estado da arte dos nanofluidos

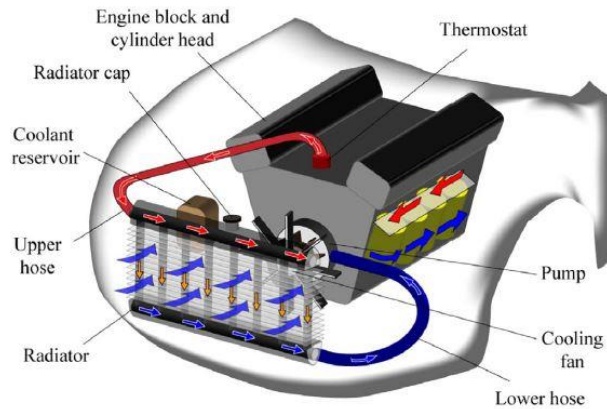


Figura 2. 9: Motor automóvel e respetivo radiador (Che Sidik, Witri Mohd Yazid, e Mamat 2017).

Permutadores de calor

Os permutadores de calor são normalmente utilizados para transferir energia térmica entre dois ou mais meios e são em larga escala utilizados em engenharia, na indústria química, nas refinarias de petróleo, e indústrias de processamento de alimentos e entre outras (Hasanuzzaman et al. 2011). A transferência de calor dos permutadores de calor pode ser aumentada por três meios diferentes: aumento da área de transferência, aumento da temperatura e aumento do coeficiente de transferência de calor (Saidur, Leong, e Mohammad 2011). Atualmente, as tecnologias existentes já atingiram os seus limites no que concerne aos dois primeiros meios, o mesmo não acontece para o terceiro. Através do uso de nanofluidos, conseguem-se atingir coeficientes de transferência de calor elevados aumentando a condutividade térmica da suspensão.

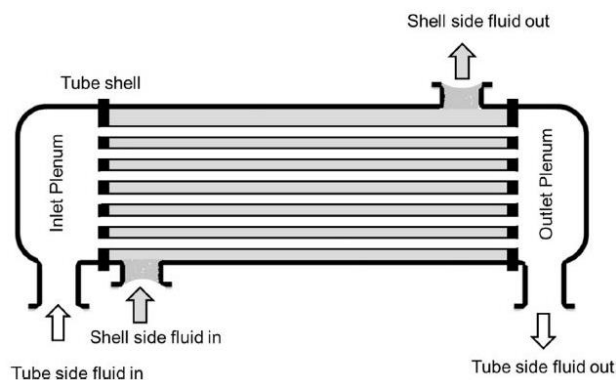


Figura 2. 10: Permutador de calor Casca e tubo (Whalley e Ebrahimi 2018).

Coletores Solares

Mais uma vez, a elevada condutividade térmica do nanofluido é o fator chave, pelo que é responsável pelo aumento da performance térmica dos sistemas presentes nos coletores solares. Tyagi et al, concluíram que a eficiência dos coletores solares foi melhorada de acordo com a concentração de partículas (Tyagi, Phelan, e Prasher 2009). No entanto, não obtiveram relação com o tamanho das partículas. Não obstante, a utilização de nanofluidos como fluido de circulação, permite melhorar a eficiência do coletor.

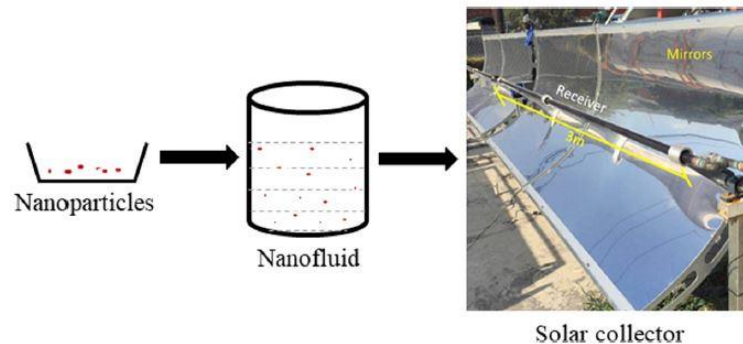


Figura 2. 11: Aplicação de nanofluidos em coletores solares (Tyagi, Phelan, e Prasher 2009).

Dispositivos eletrônicos

Devido aos tremendos avanços tecnológicos, os dispositivos eletrônicos são cada vez mais compactos e mais leves, sem comprometer as suas velocidades de processamento que são cada vez maiores. Posto isto, é possível constatar que maiores fluxos de calor são gerados nestes dispositivos, pelo que o arrefecimento dito tradicional, a ar, deixa de ser suficiente (Tullius, Vajtai, e Bayazitoglu 2011). Como consequência, torna-se inevitável o recurso a líquidos refrigerantes, facto este que leva ao uso de nanofluidos, uma vez que as suas propriedades termofísicas são de excelência em processos de transferência de calor.

Estado da arte dos nanofluidos



Figura 2. 12: Dissipadores de calor, comercialmente utilizados em dispositivos eletrônicos (Colangelo et al. 2017)

Termossifões

A nanotecnologia tem vindo a ser aplicada nos mais variados âmbitos da ciência, por forma a melhorar a performance de processos tecnológicos e a reduzir o tamanho de dispositivos utilizados nos mais diversos ramos da tecnologia (Narei, Ghasempour, e Noorollahi 2016; Amin et al. 2015). Uma vez que através do uso de nanofluidos potencia-se a ebulição e a condensação (Sarafraz, Hormozi, e Peyghambarzadeh 2016; Akhavan-Behabadi et al. 2015), a sua aplicação em termossifões vê-se justificada pelo aumento da sua performance térmica (Buschmann 2013).

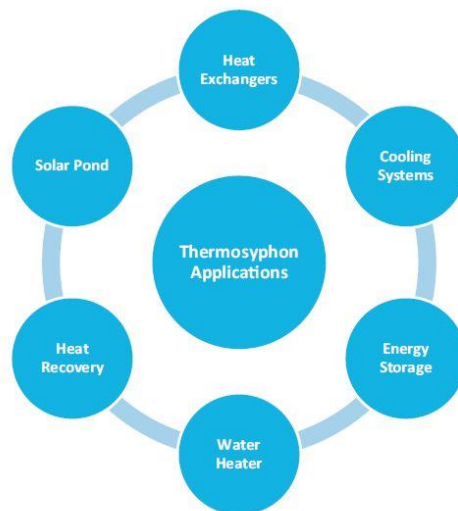


Figura 2. 13: Aplicações de maior relevância dos termossifões.(Ramezanizadeh et al. 2018)

(Grab et al. 2014) investigou a performance de um termossifão utilizando um nanofluido constituído por nanopartículas de dióxido de titânio e ouro, sendo que os resultados obtidos mostram que pela aplicação de um nanofluido de ouro é possível atingir

resistências térmicas cerca de 20% inferiores às obtidas quando o fluido utilizado é água desionizada.

Na Figura 2. 14, encontra-se representado o mais simples funcionamento de um termossifão.

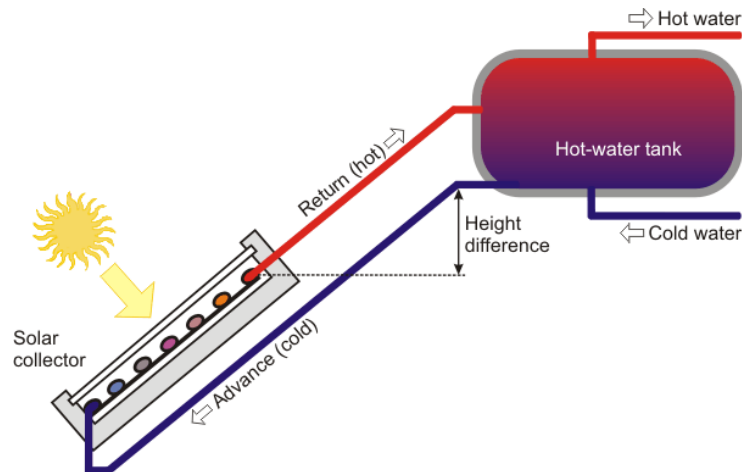


Figura 2. 14: Princípio de funcionamento de um termossifão.

2.2 Propriedades Termofísicas

A performance dos nanofluidos, em transferência de calor, faz-se depender, evidentemente, das propriedades termofísicas do nanofluido em questão, que por sua vez são função dos parâmetros quer das nanopartículas, quer do fluido base. Como tal, é de interesse abordar todas as questões associadas à performance dos nanofluidos e, como consequência, é fulcral mencionar e focar a relação existente entre as propriedades termofísicas dos nanofluidos, bem como os parâmetros dos nanofluidos de que estas são função. Para tal, será feita uma alusão a cada uma das propriedades termofísicas dos nanofluidos, evidenciando os passos existentes para a sua determinação teórica, através de cálculos.

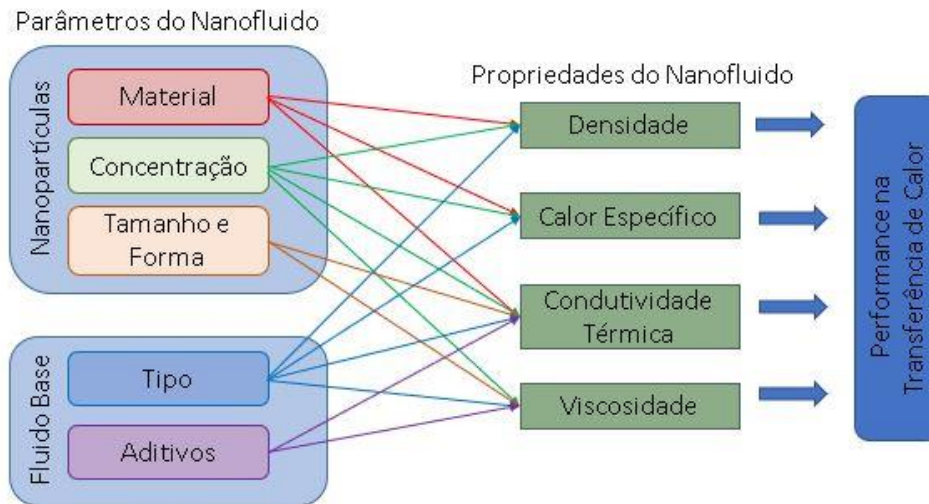


Figura 2. 15: Complexidade associada às propriedades dos nanofluidos e aos parâmetros que as influenciam, tendo implicações na sua performance.

2.2.1 Condutividade térmica

O aumento da condutividade térmica de um fluido pela adição, ainda que em pequena percentagem, de nanopartículas é importante, uma vez que terá efeito na transferência de calor por convecção do fluido em questão, nanofluido (Murshed, Leong, e Yang 2009).

São várias as metodologias de cálculo existentes no que concerne à determinação da condutividade térmica dos nanofluidos. No entanto, é possível dividir os modelos existentes em dois grandes grupos, sendo estes constituídos por modelos estáticos ou por modelos dinâmicos.

Modelos estáticos

Nestes modelos é assumido que a posição das nanopartículas é estática e, assim, a condutividade térmica é calculada a partir da condutividade térmica do fluido, da condutividade térmica das nanopartículas e da sua concentração. Neste tipo de modelos, na região da interface, de espessura nanométrica, existente entre a nanopartícula e o fluido base, moléculas fluídicas estão ligadas ou orientadas na interface partícula/fluido resultando em propriedades termofísicas únicas que são diferentes quer das nanopartículas quer das do fluido base. Torna-se então importante considerar esta interface como que um componente existente na mistura partícula-fluido, para que o seu efeito seja incluído (Murshed, Leong, e Yang 2009).

O modelo de Maxwell, Equação (4), utilizado para o cálculo da condutividade térmica de nanofluidos, é um modelo empírico, simples e que garante uma boa aproximação à temperatura ambiente. É aplicado apenas quando as partículas utilizadas são esféricas e em pequenas concentrações. Durante vários anos foi o modelo preferencialmente utilizado e por isso serviu de base para a elaboração de outros modelos mais complexos e elaborados, através de correções e da adição de outros parâmetros. Sendo um modelo estático, este não entra em linha de conta com a interação entre as nanopartículas e a camada interfacial (P. K. Das 2017).

$$K_{nf_{Maxwell}} = K_{fb} \left(\frac{K_p + 2K_{fb} + 2\varphi(K_p - K_{fb})}{K_p + 2K_{fb} - 2\varphi(K_p - K_{fb})} \right) \quad (4)$$

Nesta equação e nas seguintes, K_{fb} remete para a condutividade térmica do fluido base, K_p à condutividade das nanopartículas, φ à concentração de nanopartículas e K_{nf} à condutividade térmica prevista para o nanofluido no modelo em questão.

Tendo por base o modelo de Maxwell, surgiu o modelo de Hamilton & Crosser (P. K. Das 2017), Equação (5). No entanto, este modelo é utilizado para partículas não-esféricas uma vez que tem em conta a forma da partícula. Surge então o fator de forma, n (Equação (6)), que é calculado tendo em conta a esfericidade da partícula, w , sendo que esta é definida como a relação existente entre a área da superfície de uma esfera equivalente e a área real da superfície da partícula. Deste modo, a esfericidade de uma partícula varia de acordo com a sua forma.

$$K_{nf_{H\&C}} = \frac{K_p + (n-1)K_{fb} - \varphi(n-1)(K_{fb} - K_p)}{K_p + (n-1)K_{fb} + \varphi(K_{fb} - K_p)} \quad (5)$$

$$n = \frac{3}{w} \quad (6)$$

Neste modelo, o tamanho das partículas e a temperatura vêm a sua influência desprezada. O valor da condutividade térmica previsto para este modelo é geralmente inferior ao obtido experimentalmente.

Quando não existe informação suficiente a cerca do formato das partículas, o modelo de Wasp (P. K. Das 2017) pode ser empregue. Este, uma derivação do modelo de Hamilton & Crosser, é utilizado na particularidade das partículas serem perfeitamente esféricas, ou seja, $n=1$.

Modelos dinâmicos

Incluem e baseiam-se no movimento aleatório das partículas, movimento Browniano. Nestes modelos as nanopartículas já não se consideram estáticas, e este fator é responsável pelo transporte de energia através de colisões entre as nanopartículas. Considerando o movimento Browniano, é possível uma melhor representação dos mecanismos e, pelo facto da complexidade destes modelos serem maiores, também as suas expressões são mais elaboradas (Jang e Choi 2004b; Prasher, Bhattacharya, e Phelan 2006).

O modelo de Xuan (P. K. Das 2017), Equação (7), baseado no modelo de Maxwell, é utilizado para o cálculo da condutividade térmica de nanofluidos tendo em conta o efeito do movimento Browniano e da formação de *clusters*.

$$Knf_{Xuan} = Knf_{Maxwell} + \frac{1}{2} \rho_p C p_p \varphi D_B \quad (7)$$

A difusão Browniana, D_B , Equação (8), é afetada pelo efeito da Temperatura, viscosidade do fluido base e presença de *clusters*.

$$D_B = \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi \mu_{fb} r_c}} \quad (8)$$

Na equação (8), k_B indica a constante de Boltzmann, T a temperatura do fluido, μ_{fb} a viscosidade do fluido base e r_c o raio médio dos clusters formados pela aglomeração de nanopartículas.

O modelo de Kleinstreuer (Koo e Kleinstreuer 2004), Equação (9), é aplicado no cálculo da condutividade térmica dos nanofluidos considerando a energia cinética das nanopartículas devido ao movimento Browniano, de forma semelhante ao de Xuan. O efeito do tamanho das nanopartículas, da concentração, da temperatura e das propriedades do fluido base também são tidas em conta. De um modo geral, este modelo soma ao valor da condutividade prevista pelo modelo de Maxwell, a componente referente ao ganho da condutividade térmica dinâmica.

$$Knf_{Kleinstreuer} = Knf_{Maxwell} + \frac{5 \times 10^4}{k_{fb}} \beta(\varphi) \rho_{fb} C p_{fb} f(T, \varphi) \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} \quad (9)$$

Na equação (9) é possível observar a presença de duas funções, f e β , as quais são obtidas através de resultados experimentais que refletem a influencia dos parâmetros referidos no parágrafo anterior.

A função f , Equação (10), função fatorial, descreve o efeito da condutividade térmica das partículas tendo em conta o tipo de partículas, a concentração, a temperatura e as propriedades do fluido base. No entanto, uma vez que várias constantes da equação são obtidas por calculo experimental, a equação pode ser simplificada. Deste modo, a função fatorial tem simplesmente em conta o efeito da temperatura e da concentração pois estes dois parâmetros são os de maior relevo.

$$f(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.04705)T + (1722.3\varphi - 134.63) \quad (10)$$

A função β , Equação (11) é apenas afetada pela concentração sendo que os restantes parâmetros são tidos em conta pela função f .

$$\beta(\varphi) = 0.0017(100\varphi)^{-0.084} \quad (11)$$

Existem ainda outros modelos, pelos quais a condutividade térmica dos nanofluidos pode ser determinada, que não foram abordados. Contudo, serão brevemente apresentados na Tabela 2.2, a título informativo.

Tabela 2.2: Modelos utilizados no cálculo da condutividade térmica de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores.

| Modelos | Observações | Referências |
|--|--|----------------------------|
| <p>Jang e Choi</p> $k_{nf} = k_{fb}(1 - \varphi) + k_p\varphi + 3C_1 \frac{d_f}{d_{np}} k_{fb} Rr^2 Pr\varphi$ <p>Onde, $\beta = 0.01$, $C_1 = 18 \times 10^6$, é uma constante proporcional</p> | <p>Tem em atenção à colisão entre as moléculas do fluido base, à difusão térmica das nanopartículas e à colisão entre as mesmas e as moléculas do fluido base induzidas por flutuações térmicas.</p> | <p>(Jang e Choi 2004a)</p> |
| <p>Chon et al.</p> $\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 64.7\varphi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_{np}}\right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.07476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321}$ | <p>Revela o efeito da temperatura e do tamanho das nanopartículas.</p> | <p>(Chon et al. 2005)</p> |

| | | |
|--|---|----------------------------------|
| <p>Yu e Choi</p> $\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = \frac{k_{pe} + 2k_{fb} + 2(k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3 \varphi}{k_{pe} + 2k_{fb} - (k_{pe} - k_{fb})(1 + \beta)^3 \varphi}$ | <p>Deriva do modelo de Maxwell e contabiliza o efeito da presença de <i>nanolayers</i>.</p> | <p>(Yu e Choi 2003)</p> |
| <p>Mintsa et al.</p> $\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1.72\varphi + 1.0$ | <p>Modelo simples, contabiliza apenas a condutividade do fluido base e a concentração de nanopartículas, φ, que pode ser determinada por uma simples regressão linear.</p> | <p>(Mintsa et al. 2009)</p> |
| <p>Yamada e Ota</p> $k_{eff} = \frac{\frac{\frac{k_{np}}{k_{fb}} + K - K\varphi(1) - k_{np}}{k_{fb}}}{\frac{\frac{k_{np}}{k_{fb}} + K - K\varphi(1) - k_{np}}{k_{fb}}} k_{fb}$ | <p>Tem em conta o fator de forma das nanopartículas e propõe um modelo como se de uma célula unitária se tratasse. Utilizado na determinação da condutividade térmica de misturas de nanofibras de carbono.</p> | <p>(Yamada e Ota 1980)</p> |
| <p>Nan, Shir e Lin</p> $k_{eff} = 1 + \varphi \frac{k_{np}}{3k_{fb}} k_{fb}$ | <p>Utilizado para prever a condutividade térmica efetiva de compósitos à base de nanotubos de carbono.</p> | <p>(Nan, Shi, e Lin 2003)</p> |
| <p>D. H. Kumar et al.</p> $k_{eff} = k_{fb} + C \frac{2k_B T}{(\pi v d_p^2)} \frac{\varphi r_{fb}}{k_{fb}(1 - \varphi)r_p} k_{fb}$ | <p>Modelo possível de ser utilizado quando de grandes aumentos de condutividade térmica, do nanofluido relativamente ao fluido base, se tratam. Contabiliza a interação entre as partículas.</p> | <p>(D. H. Kumar et al. 2004)</p> |
| <p>Li e Peterson</p> $\frac{k_{eff} - k_{fb}}{k_{fb}} = 0.764\varphi + 0.0187(T) - (273.15) - 0.462$ | <p>Relaciona a condutividade térmica do nanofluido com a temperatura e com a concentração. Apenas pode ser utilizado para temperaturas e frações volúmicas relativamente baixas, 27°C a 36°C e 2%, 6%, 10%, respetivamente.</p> | <p>(Li e Peterson 2006)</p> |
| <p>Corcione</p> $\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = 1 + 4.4Re^{0.4}Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_{np}}{k_{fb}}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}$ | <p>Apresenta validade para amplos intervalos de diâmetros de nanopartículas, frações volúmicas e temperaturas. Do ponto de vista da engenharia, revela-se útil.</p> | <p>(Corcione 2011)</p> |

2.2.2 Viscosidade

Antes de se proceder à elaboração de um sistema térmico onde o fluido de trabalho será um nanofluido, em primeiro lugar é fulcral ter conhecimento sobre as propriedades

termofísicas do nanofluido em questão, tais como a condutividade térmica, o calor específico, a massa volúmica e a viscosidade. Dois fatores importantes que se fazem depender da viscosidade, são a potência necessária para bombeamento e a queda de pressão, uma vez que com o aumento da viscosidade, a energia necessária para o bombeamento do nanofluido também aumenta. Deve-se ainda salientar que, de entre as propriedades do nanofluidos, é a viscosidade que indica a resistência do fluido (Mahbubul, Saidur, e Amalina 2012a). Parâmetros como o método de preparação do nanofluido, o tipo de fluido base, a forma e o tamanho das partículas utilizadas, a concentração, a temperatura, a acidez, o uso de surfactantes e a formação de clusters, são todos parâmetros que afetam a viscosidade do nanofluido (Mahbubul, Saidur, e Amalina 2012b).

A primeira teoria a existir capaz de prever a viscosidade de nanofluidos é o modelo de Einstein (Einstein 1906; 1956), o qual prevê e assume concentrações de nanopartículas muito baixas, inferiores a 2%, assumindo ainda que as partículas são esféricas e que o fluido é linearmente viscoso, ou seja, o aumento da viscosidade do nanofluido aumenta linearmente com o aumento da concentração das partículas. Surgem então a Equação (12), (Mahian et al. 2013):

$$\mu_{nf} = [1 + 2.5\varphi]\mu_{fb} \quad (12)$$

Mais tarde, tendo por base o modelo de Einstein, (Brinkman 1952) alterou e estendeu o seu modelo para que o fosse possível aplicar em nanofluidos cuja concentração de nanopartículas fosse inferior a 4%. A respetiva Equação (13) é:

$$\mu_{nf} = \left[\frac{1}{(1 - \varphi)^{0.25}} \right] \quad (13)$$

Não obstante, os modelos até agora apresentados carecem de razoabilidade uma vez que ambos desprezam a interação existente entre as partículas, sendo que este é um dos mecanismos de maior relevo na determinação do comportamento dos nanofluidos. Por forma a ultrapassar este facto, Batchelor (Batchelor 1977), considerando o efeito do movimento Browniano, propôs um modelo que tivesse em atenção a dependência existente com a concentração e, deste modo, uma melhor representação da interação entre as partículas pode ser alcançada tal como está presente na Equação (14):

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi + 6.2\varphi^2)\mu_{fb} \quad (14)$$

Neste modelo, a gama de contrações em que pode ser aplicado vê-se aumentada para concentrações inferiores a 10%.

Outros modelos em que a dependência com a concentração não fosse desprezada surgiram, como foi o caso do modelo de Nielsen (Nielsen 1970), capaz de determinar a viscosidade do nanofluidos para concentrações superiores a 0.02%, permitindo deste modo aumentar a gama de viscosidades para as diferentes concentrações. Surgem então a Equação (15) (Mahbubul, Saidur, e Amalina 2012b; Mishra et al. 2014):

$$\mu_{nf} = (1 - 1.5\varphi)e^{\frac{\varphi}{(1-\varphi_m)}\mu_{nf}} \quad (15)$$

Na equação (15), o parâmetro φ_m corresponde à concentração máxima e pode ser calculado teoricamente ou obtido a partir dos volumes da sedimentação (Nielsen 1970).

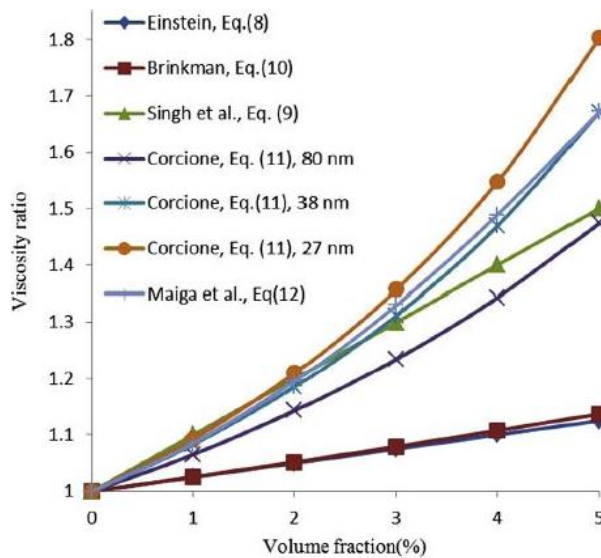


Figura 2.16: Comparação da viscosidade de acordo com a concentração, para diferentes modelos.(Mahian et al. 2013)

Existem ainda outros modelos teóricos, dos quais alguns estão mencionados na figura anterior, que são apresentados na Tabela 2.3:

Tabela 2.3: Modelos utilizados na previsão da viscosidade de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores.

| Modelos | Observações | Referências |
|---|--|--------------------------|
| Vand $\mu_{eff} = (1 + 2.5\varphi + 7.349\varphi^2)\mu_{fb}$ | Modelo para nanopartículas esféricas. | (Vand 1948) |
| Frankel e Acrivos | Aplicável apenas para nanopartículas esféricas com concentrações volúmicas compreendidas entre 0.5236 e 0.7405 | (Frankel e Acrivos 1967) |

| | | |
|---|--|--|
| $\mu_{eff} = \frac{9}{8} \frac{\left(\frac{\varphi}{\varphi_{m\acute{a}x}}\right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_{m\acute{a}x}}\right)^{\frac{1}{3}}} \mu_{fb}$ | | |
| <p>X. Wang, Xu e S.Choi</p> $\mu_{nf} = (1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2)\mu_{fb}$ | <p>Modelo utilizado para prever a viscosidade de nanofluidos de água com Al₂O₃ e de Etilenoglicol com Al₂O₃.</p> | <p>(X. Wang, Xu, e S. Choi 1999)</p> |
| <p>Tseng e Lin</p> $\mu_{eff} = (13.47e^{35.98\varphi})\mu_{fb}$ | <p>Neste modelo é assumido que a viscosidade aumenta de forma exponencial de acordo com a concentração volúmica.</p> | <p>(Tseng e Lin 2003)</p> |
| <p>Namburu et al.</p> $\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT}$ $A = 1.8375(\varphi)^2 - 29.642\varphi + 165.56 \text{ com, } R^2 = 0.9873$ $B = 4 \times 10^{-6}\varphi^2 - 0.001\varphi + 0.0186 \text{ com, } R^2 = 0.988$ | <p>Para aplicação deste modelo, o tamanho das nanopartículas manteve-se em 29nm, variando apenas a concentração volúmica. Utilizado para medir nanofluidos de água com CuO e de etilenoglicol com CuO.</p> | <p>(Namburu et al. 2007)</p> |
| <p>Massoumi, Sohrabi e Behzadmehr</p> $\mu_{nf} = \mu_{fb} + \frac{\rho PV_B d_{np}^2}{72C\delta}$ <p>δ – distância entre nanopartículas</p> | <p>Prevê a viscosidade baseando-se no movimento Browniano. Este modelo consegue ainda prever a viscosidade de um fluido constituído por dois fluidos diferentes.</p> | <p>(Masoumi, Sohrabi, e Behzadmehr 2009)</p> |
| <p>Corcione</p> $\frac{\mu_{eff}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_{np}}{d_{fb}}\right)^{-0.3} \varphi^{1.03}}$ | <p>Prevê a viscosidade de nanofluidos de água com Al₂O₃.</p> | <p>(Corcione 2011)</p> |
| <p>C. T. Nguyen et al.</p> <p>i) $\mu_{nf} = \mu_{fb} \times 0.904e^{0.1482\varphi}$</p> <p>ii) $\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 0.025\varphi + 0.015\varphi^2)$</p> <p>iii) $\mu_{nf} = \mu_{fb}(1.475 - 0.319\varphi + 0.051\varphi^2) + 0.009\varphi^3$</p> | <p>Correlação i) para nanofluidos de água com Al₂O₃, com diâmetro das nanopartículas de 47nm Correlação ii) para nanofluidos de água com Al₂O₃, com diâmetro das nanopartículas de 36nm Correlação iii) para nanofluidos de água com CuO</p> | <p>(C. T. Nguyen et al. 2007)</p> |

2.2.3 Calor Específico

Atualmente, ao contrário de propriedades como a condutividade térmica e viscosidade, ainda existe pouca investigação relativamente à determinação do calor específico de um nanofluido. No entanto, por forma a que a capacidade térmica de um nanofluido seja devidamente determinada, é essencial determinar o seu calor específico com precisão (Zeinali Heris, Etemad, e Nasr Esfahany 2006; S.-Q. Zhou e Ni 2008).

O calor específico dos nanofluidos pode ser aumentado ou diminuído de acordo com o fluido base, propriedades como a temperatura e a concentração de nanopartículas também têm efeito. Já foi verificado que o calor específico de um nanofluido é tanto maior quanto maior o diâmetro das nanopartículas. O uso de aditivos, como o dispersante, também apresenta uma significativa influência (Shahrul et al. 2014). Contudo, os estudos até então feitos, sobre a influência das propriedades do nanofluido relativamente ao calor específico, relevam contrariedade (Shahrul et al. 2014), pelo que o modelo utilizado neste trabalho e apresentado pela Equação (16), é apenas uma média ponderada das propriedades do fluido base e das nanopartículas (Pang, Lee, e Kang 2015):

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi \rho_{np} C_{p_{np}} + (1 - \varphi) \rho_{fb} C_{p_{fb}}}{\rho_{nf}} \quad (16)$$

Não obstante, existem ainda outros modelos, segundo os quais, o calor específico de um nanofluido pode ser determinado. Os mesmos encontram-se disponíveis na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Modelos utilizados na previsão do calor específico de nanofluidos, sugeridos por vários investigadores.

| Modelo | Observações | Referências |
|--|--|------------------------|
| Pak e Cho $C_{p_{nf}} = \varphi C_{p_{np}} + (1 - \varphi) C_{p_{fb}}$ | Modelo baseado na teoria de mistura de fases ideais. Verifica-se que o calor específico diminui com o aumento da concentração de nanopartículas. | (Pak e Cho 1998) |
| Ghazvini et al. $C_{p_{nf}} = 2.62 - 6 \times 10^{-3} T + 2 \times 10^{-5} T^2$ | Modelo utilizado para uma concentração de 1% de nanopartículas de diamante. O mesmo relaciona o calor específico com a temperatura, sendo estes proporcionais. | (Ghazvini et al. 2012) |
| Vajjha e Das | Correlação para o calor específico como função da concentração, temperatura e do calor específico de três | (Vajjha e Das 2009) |

Estado da arte dos nanofluidos

| | | |
|--|--|--|
| $\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{fb}}} = \frac{A \times T + B \left(\frac{C_{p_{np}}}{C_{p_{fb}}} \right)}{(C + \varphi)}$ | <p>tipos de nanopartículas diferentes, sendo que os resultados mostram que nos três nanofluidos diferentes, o calor específico diminuiu com o aumento da concentração.</p> | |
| <p style="text-align: center;">Vajjha e Das</p> $\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{fb}}} = \frac{A \left(\frac{T}{T_0} \right) + B \left(\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{fb}}} \right)}{(C + \varphi)}$ | <p>Adicionalmente verificou-se que o calor específico aumentou com o aumento da temperatura.</p> | (Vajjha e Das 2012) |
| <p style="text-align: center;">L. P. Shou et al.</p> $C_{p_{nf}} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{fb}C_{p_{fb}} + \varphi\rho_{np}C_p}{\varphi\rho_{fb} + (1 - \varphi)\rho_{np}}$ | <p>Conclui que com o aumento da concentração, o calor específico do nanofluido de CuO-EG, diminui gradualmente</p> | (L.-P. Zhou et al. 2010) |
| <p style="text-align: center;">Shin e Banerjee</p> $C_{p_{nf}} = \frac{\rho_{np}\varphi_{np}C_{p_{np}} + \rho_{fb}\varphi_{fb}C_{p_{fb}}}{\varphi_{np}\rho_{np} + \varphi_{fb}\rho_{fb}}$ | <p>Correlação utilizada para medir o calor específico de nanofluidos aplicados em sistemas de armazenamento de energia térmica. Neste modelo, a temperatura apresentou escasso efeito na alteração do calor específico do nanofluido em questão.</p> | (Shin e Banerjee 2011) |
| <p style="text-align: center;">Fakoor Pakdamanm Akhavan-Behabadi e Razi</p> $\frac{C_{p_{fb}} - C_{p_{nf}}}{C_{p_{fb}}} = (0.0128 \times T + 1.8382)\varphi^{0.4779}$ | <p>Conclui que pela dispersão de nanopartículas no fluido base, resulta numa diminuição do calor específico do nanofluido.</p> | (Fakoor Pakdaman, Akhavan-Behabadi, e Razi 2012) |

2.2.4 Massa Volúmica, massa específica ou densidade absoluta

De modo semelhante, também a massa volúmica pode ser calculada por meio de uma média ponderada de propriedades do fluido base e das nanopartículas, Equação (17) (Pang, Lee, e Kang 2015):

$$\rho_{nf} = \rho_p\varphi + \rho_{fb}(1 - \varphi) \tag{17}$$

2.3 Meios de incremento da condutividade térmica

De acordo com diversos estudos efetuados, existem quatro mecanismos principais responsáveis pelo ganho da condutividade térmica dos nanofluidos, como o movimento Browniano, a aglomeração das nanopartículas, a natureza de transporte das nanopartículas, e a presença de uma interface líquido/sólido. No entanto, quando os estudos são feitos à escala nanométrica, muito facilmente ocorrem oscilação dos resultados obtidos dada a sensibilidade existente, pelo que ainda existem diversas questões relativamente à maneira como os problemas devem ser encarados (Pang, Lee, e Kang 2015). A Figura 2. 17 mostra a globalidade dos parâmetros com influência na condutividade térmica dos nanofluidos.

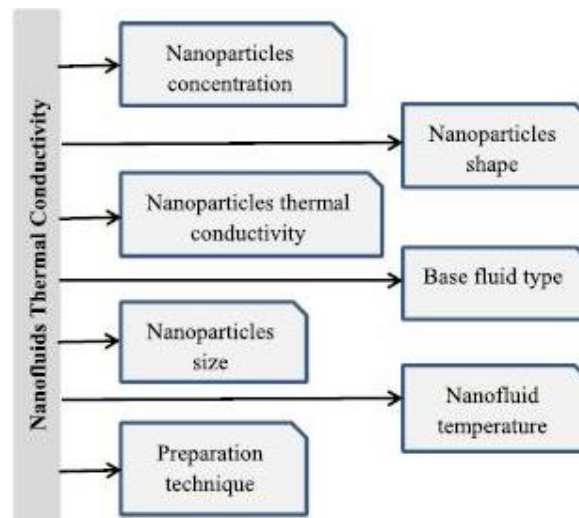


Figura 2. 17 Parâmetros que afetam a condutividade térmica do nanofluido (Mamat 2019).

2.3.1 Movimento Browniano

O movimento Browniano caracteriza-se pelo movimento aleatório que uma partícula dispersa num fluido apresenta, assumindo ainda que durante tal movimento existem colisões entre esta partícula e as restantes e que a cada colisão, ocorre transporte direto de energia entre as partículas envolvidas.

Inicialmente, pensava-se que este mecanismo seria o principal responsável pelo aumento da condutividade térmica dos nanofluidos, uma vez que o raciocínio de que pelo aumento da concentração de partículas, aumenta o número de colisões que por sua vez aumenta o transporte de energia, parecia bastante evidente.

Não obstante, (Daviran et al. 2017) mostra que este mecanismo pode até ser negligenciado, o que foi justificado pela observação de que em amostras com fluidos de maior viscosidade atingiram-se maiores condutividades. Para tal, utilizou-se dois fluidos base com

propriedades termofísicas semelhantes com a exceção da viscosidade e em ambos se misturou a mesma quantidade de nanopartículas

(Kebllinski et al. 2002) sugere até que a dependência do aumento da condutividade térmica no movimento Browniano poderá ser insignificante, uma vez que a difusão browniana das nanopartículas obtida foi significativamente mais lenta que a difusão do próprio fluido base, cerca de 28 vezes mais lenta (Sarkar e Selvam 2007)

Apesar do efeito do movimento Browniano no aumento da condutividade térmica ser desprezável, de uma forma não direta este continua a apresentar um papel de relevo no aumento da condutividade, uma vez que influencia outros mecanismos de ganho de condutividade.

2.3.2 Aglomeração das nanopartículas

A aglomeração de nanopartículas possibilita o aumento da condutividade térmica do nanofluido, uma vez que possibilita a criação de zonas com menor resistência térmica ao longo do fluido. São estas zonas as principais responsáveis pelo transporte de calor de uma forma mais rápida.

De acordo com (Daviran et al. 2017), a temperatura assume uma posição de relevo relativamente à morfologia destes aglomerados de nanopartículas. Tal pode ser observado na Figura 2.18:

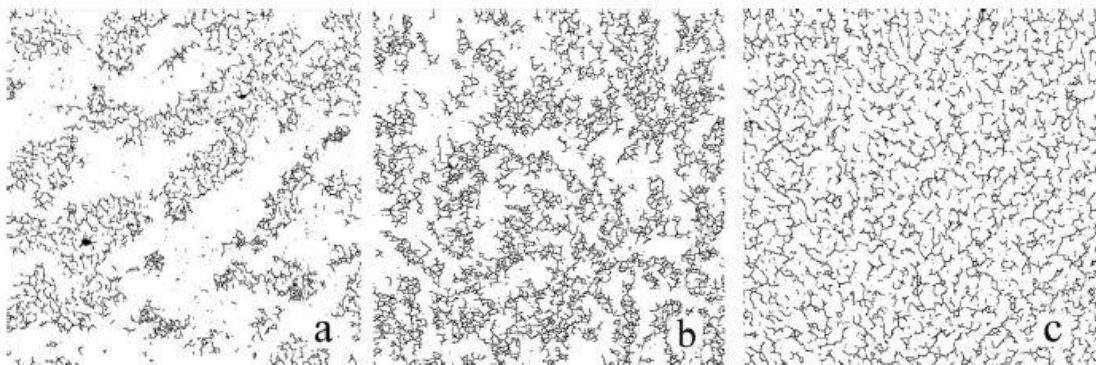


Figura 2.18: Amostras microscópicas de um nanofluido (0.8%CNT num óleo sintético) retiradas às temperaturas de: a – Amostra congelada, -79°C; b: Temperatura ambiente; c: 100°C (Daviran et al. 2017)

Na Figura 2.18 observa-se que para temperaturas mais baixas, o nanofluido apresenta zonas ricas em nanopartículas e zonas sem nanopartículas (Prasher, Phelan, e Bhattacharya 2006). De forma um quanto aposta, para temperaturas mais elevadas observa-se que estes aglomerados começam a se dispersar, pelo que o nanofluido se torna mais homogêneo.

(Daviran et al. 2017) concluíram ainda que para maiores temperaturas, estando as nanopartículas mais dispersas, o transporte de calor vê-se facilitado levando a uma maior condutividade térmica efetiva. Em contraste, aglomerados isolados a baixas temperaturas, atuam de forma inversa, o que levaria a condutividades mais baixas.

2.3.3 Natureza de transporte nas nanopartículas

Em sólidos cristalinos, como nos usados em nanofluidos, ou seja, como as nanopartículas, o calor é transportado através de *phonons*, por outras palavras, através da propagação de vibrações. Estes *phonons* são criados e propagam-se de forma aleatória. Através da difração nos átomos das nanopartículas, estas vibrações espalham-se em diversas direções a elevada velocidade. O aumento da condutividade térmica através de *phonons*, é conseguido por uma propagação mais intensa das vibrações entre as nanopartículas, possibilitado pela criação de pontes térmicas ao longo do fluido capaz de conectar as partículas e promover a propagação contínua das vibrações. Facilmente se conclui que, quanto menor for a distância existente entre as nanopartículas, mais facilmente ocorrerá a propagação das vibrações e, deste modo, aumenta a energia transportada entre partículas (Kebinski et al. 2002).

Adicionalmente, é possível incluir o efeito da concentração das nanopartículas e do movimento Browniano neste tipo de mecanismo, uma vez que havendo uma maior concentração de partículas e para partículas de menores dimensões, o impacto destas vibrações faz-se sentir em maior escala.

2.3.4 Estratificação interface líquido-sólido

Na interface entre as nanopartículas (fase sólida) e o fluido (fase líquida), cria-se uma pequena camada, com espessura inferior a 1 nm, na qual a estrutura atómica do fluido nessa região encontra-se significativamente mais ordenada do que está no restante fluido. Com este ordenamento, resultante pela presença das nanopartículas, consegue-se aumentar a condutividade térmica efetiva naquelas regiões (P. K. Das 2017).

Dado que os sólidos cristalinos, obviamente ordenados, apresentam maior condutividade térmica que os seus correspondentes líquidos, facilmente se conclui que nesta camada de líquido existente na interface é expectável que conduza a maiores condutividades térmicas (Kebinski et al. 2002).

Quanto menor o diâmetro da partícula, maior será o aumento provocado por este efeito, uma vez que a espessura desta interface apenas se manifesta até aproximadamente 1nm, pelo que em partículas de maior dimensão, esta interface se torna insignificante. Ainda que a presença desta interface pode contribuir para o aumento do transporte de calor, esta característica não se revela capaz de por si só contribuir para um aumento significativo da condutividade térmica (Kebllinski et al. 2002).

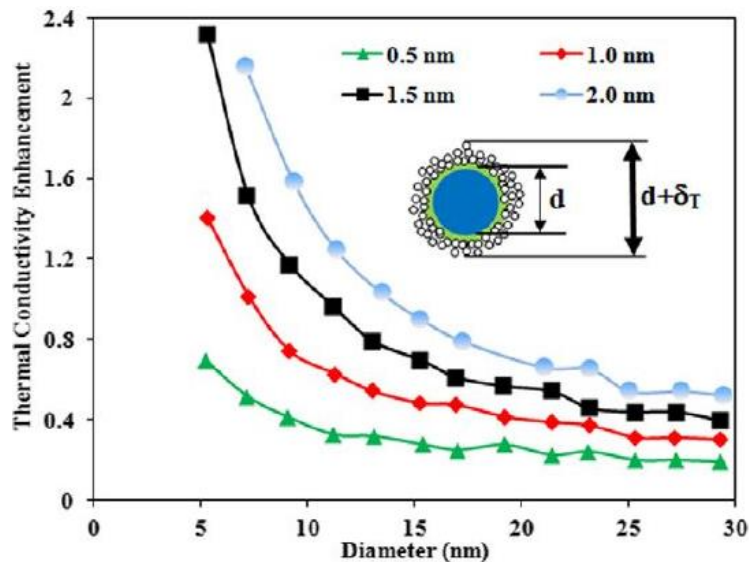


Figura 2. 19: Aumento da condutividade térmica efetiva de acordo com a interface líquido/sólido gerada pela presença de uma nanopartícula. Pode-se observar o efeito que esta interface representa (P. K. Das 2017).

Na Figura 2. 19, d representa o diâmetro da partícula, δ_T representa o dobro da espessura da interface criada. Adicionalmente, está presente uma pequena legenda das funções, sendo que remete para a espessura da interface líquido/sólido.

2.3.5 Parâmetros que influenciam os mecanismos

Potencial Zeta

O estudo da física e da química introduziu três estados em que a matéria se pode encontrar, o sólido, o líquido e o gasoso, assim como as possíveis transformações que podem ocorrer entre eles, como é o caso da fundição, da sublimação e da evaporação, entre outras (Everett 1988).

Existem ainda as soluções, aparte das substâncias puras, que podem ser dispersões homogêneas ou heterogêneas de duas ou mais diferentes espécies, misturadas a uma escala molecular. Este tipo de sistemas designa-se por coloide, em que um componente está delicadamente disperso no outro, que é o caso dos nanofluidos.

O potencial Zeta é um fenómeno electrocinético presente nos sistemas coloides. Existem características da dispersão coloidal que estão relacionadas com o potencial zeta das partículas, como é o caso na energia presente entre as partículas, que pode ser obtida através da distribuição do potencial zeta. As forças existentes entre as partículas são as responsáveis por manter a estabilidade da suspensão e por isso estão relacionadas com os fenómenos de formação de aglomerados e com o comportamento do escoamento (Mahbubul 2019b).

Na Figura 2. 20, é possível observar os níveis de estabilidade de uma suspensão de acordo com o seu valor de potencial zeta absoluto.

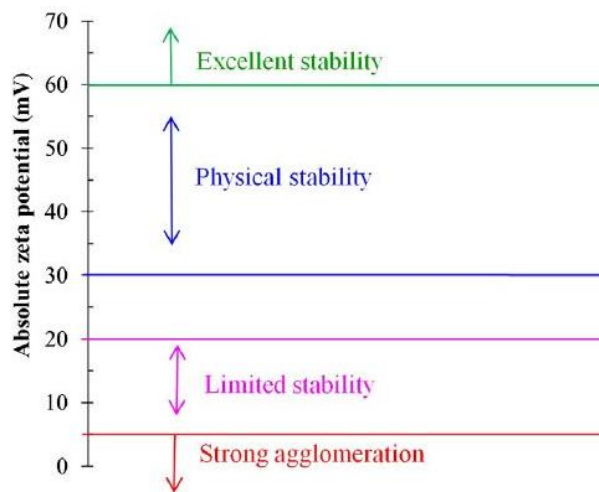


Figura 2. 20 Relação entre o valor do potencial zeta absoluto e a estabilidade da suspensão (Mahbubul 2019b)

O valor do potencial zeta não pode ser medido diretamente, mas pode ser calculado com recurso a modelos teóricos ou então determinado experimentalmente, sendo que é através do valor do potencial zeta absoluto que a estabilidade da suspensão pode ser prevista.

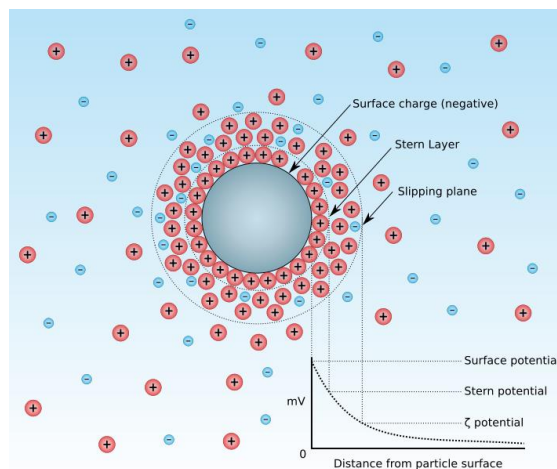


Figura 2. 21: Efeito da interface na suspensão de nanopartículas (V. 2011)

Temperatura

A condutividade térmica aumenta de acordo com o aumento da temperatura, Figura 2. 22, (Sarbolookzadeh Harandi et al. 2016). Para além disso, uma temperatura do nanofluido elevada intensifica o movimento Browniano das nanopartículas, Equação (18), consequência esta que promove um aumento da microconvecção no transporte de calor. Por outra palavras, com o aumento da temperatura, aumenta o número de colisões entre as partículas que por sua vez induz um aumento da condutividade térmica (Teng et al. 2010).

$$D_B = \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_f b r_c}} \quad (18)$$

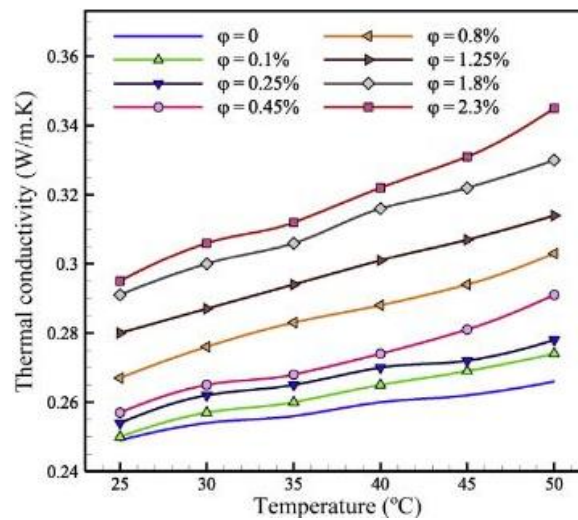


Figura 2. 22: Efeito da temperatura na condutividade térmica, para diferentes concentrações de nanopartículas em nanofluidos (Mahbulul 2019a)

Para além disso, na Figura 2. 22 é evidenciado que o aumento da concentração, intensifica os efeitos potenciados pelo aumento da temperatura (Sarbolookzadeh Harandi et al. 2016).

Concentração

De acordo com muitos investigadores e de acordo com a equação que determina a condutividade térmica do nanofluido, o aumento da concentração das partículas promove um ganho na condutividade térmica do nanofluido, Figura 2. 23. Tal acontece devido ao incremento no movimento Browniano explicado anteriormente.

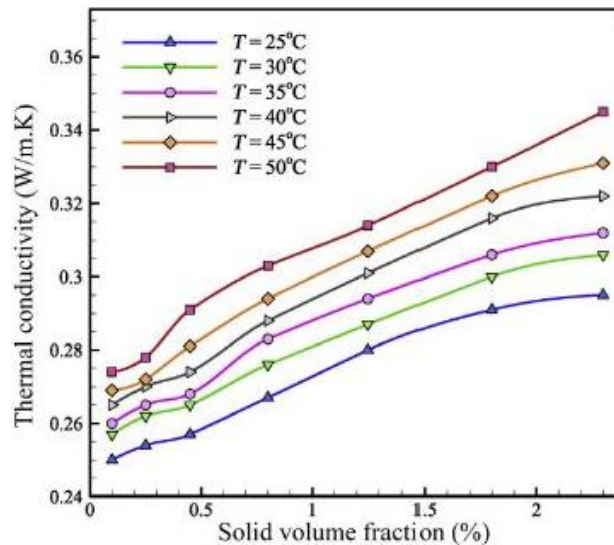


Figura 2. 23: Efeito da concentração na condutividade térmica do nanofluido, para diferentes temperaturas (Mahbulul 2019a).

Não obstante, facilmente se conclui que existe uma concentração ótima, que varia de acordo com o fluido base e com as nanopartículas utilizadas. Ultrapassando esse valor, a criação de aglomerados intensifica-se, ocorre uma maior deposição, o escoamento do fluido vê-se dificultado e conseqüentemente uma perda na condutividade térmica.

Formato das nanopartículas

Os resultados obtidos até à data, indicam que as nanopartículas cilíndricas são as que promoveram um ganho na condutividade maior que as esféricas, para um mesmo fluido base (Xie et al. 2002a).

Variando o formato das partículas é possível obter condutividades térmicas maiores, pelo que o formato das partículas desempenha um papel importante. Tal pode ser observado, recuando até aos modelos de previsão da condutividade de nanofluidos que incluem o parâmetro relativo à esfericidade, com o propósito de refletir este efeito. Adicionalmente, existem outros formatos de nanopartículas que podem ser observados na Figura 2. 24:

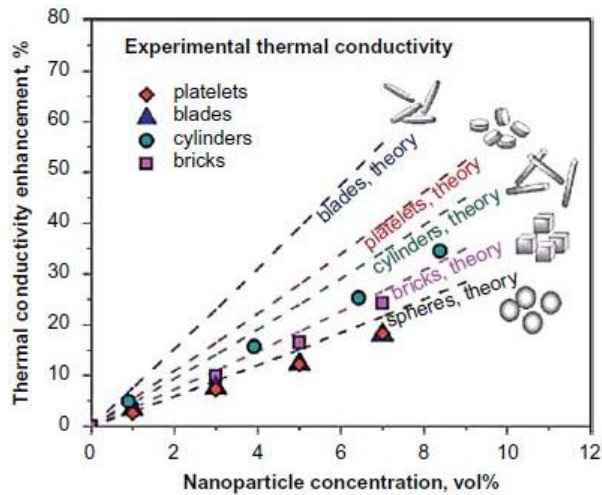


Figura 2. 24: Efeito do formato das nanopartículas no aumento da condutividade térmica do nanofluido, para diferentes concentrações (Mahbul 2019a)

Tamanho das partículas

O tamanho das partículas desempenha um papel preponderante no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos, este papel não se encontra limitado apenas à estabilidade da suspensão mas também se estende às propriedades térmicas, (Mahbul 2019a) e, com isto, é possível concluir que influencia a maioria dos mecanismos apresentados responsáveis pelo ganho da condutividade.

Na maioria dos estudos existentes, prevê-se que a condutividade aumente com a diminuição do tamanho das nanopartículas (Lee et al. 1999), o que está de acordo com os mecanismos abordados anteriormente. Este efeito observa-se na Figura 2. 25:

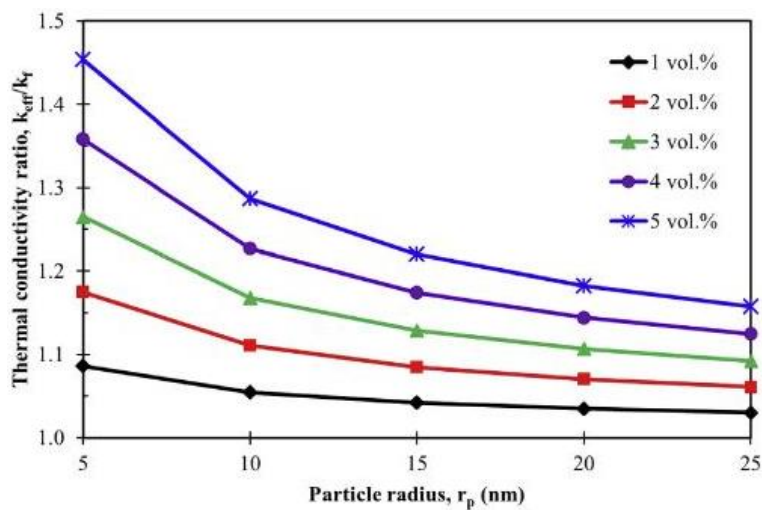


Figura 2. 25: Efeito do tamanho das nanopartículas no aumento da condutividade térmica do nanofluido, para diferentes concentrações (Mahbul 2019a).

No entanto, esta relação nem sempre se verificou verdadeira pelo que também coloca a teoria existente nos mecanismos em causa (Xie et al. 2002b; Hwang et al. 2007). Tal se verifica quando o formato das partículas apresenta maior interferência que o seu tamanho.

Fluido Base

Sendo o fluido base a base do nanofluido, facilmente se conclui que as propriedades intrínsecas destes são deveras importantes na transferência de calor. A viscosidade e a condutividade térmica do fluido base apresentam o maior interesse, uma vez que o valor destas propriedades tem ligação direta com as propriedades do nanofluido, tal pode ser verificado nos modelos apresentados para determinação da condutividade térmica do nanofluido.

Viscosidade

A viscosidade é um fator determinante na mobilidade das partículas, varia com a temperatura, e ainda é uma propriedade que apresenta interferência com a morfologia dos clusters.

Material das nanopartículas

Sendo as nanopartículas parte integrante do nanofluido, as suas propriedades terão um efeito direto nas propriedades do nanofluido. Neste caso, relativamente à condutividade térmica nas nanopartículas, quanto maior for o seu valor (obtido antes da adição ao fluido base), maior será o incremento resultante na condutividade térmica do nanofluido.

Preparação do nanofluido

Uma vez que inicialmente as nanopartículas se encontram no estado sólido, separadas do fluido base, é necessária uma preparação do nanofluido. De um jeito simples, depositam-se as nanopartículas no fluido base e uma agitação do recipiente é requerida para que ocorra a sua mistura e as nanopartículas fiquem dispersas no fluido base. Não obstante, é fulcral ter alguns cuidados nesta preparação, uma vez que existem dispersões ótimas que potenciam o fim pretendido, a transferência de calor, através da morfologia dos clusters e da qualidade da dispersão.

Uma delicada preparação dos nanofluidos é deveras importante uma vez que estes apresentam necessidades especiais como uma suspensão homogénea e estável, ligeira aglomeração de partículas e também é fulcral que o fluido não sofra alterações químicas (S. Lee et al. 1999).

Em via de se tornar possível a estabilização da suspensão, foram desenvolvidas metodologias como a alteração da acidez da suspensão, o uso de surfactantes e de ativantes, e o uso de ultrassons (Xuan e Li 2000). Por forma obter uma suspensão estável, estes métodos podem ser utilizados, dependendo do tipo de aplicação que o nanofluido terá, uma vez que alteram as propriedades da superfície das partículas e também podem ser utilizados para que a formação de aglomerados seja suprimida.

No que diz respeito à técnica de fabrico dos nanofluidos, existem duas possibilidades, podendo estes serem elaborados em uma única etapa ou em duas. Na produção em apenas uma etapa, a produção de nanopartículas e a sua dispersão no fluido base ocorre ao mesmo tempo e, no fim do procedimento, o nanofluido encontra-se com uma determinada concentração, sendo que a concentração exigida será posteriormente obtida por diluição. No fabrico de nanofluidos em duas fases, as nanopartículas são inicialmente produzidas e só posteriormente dispersas no fluido base. Este processo apresenta menores custos associados. A Figura 2. 26 esquematiza o tipo de produção de nanofluidos em duas fases, completando o processo com a adição de surfactante e pelo uso de ultrassons.

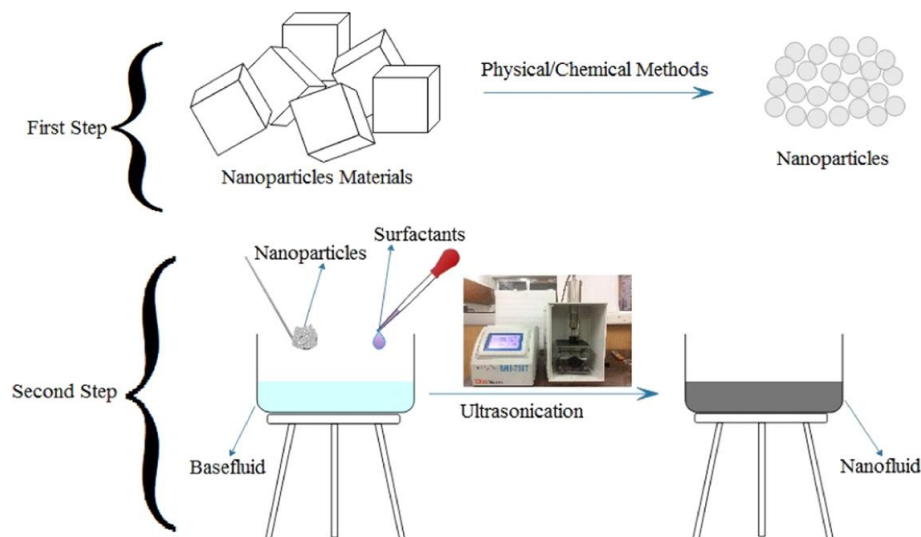


Figura 2. 26: Método de fabrico de nanofluidos em duas fases (Subudhi e Kumar 2019)

O método de obtenção de nanofluidos de etapa única, exclui o processo de secagem, de armazenamento e de transporte de nanopartículas e, por isso, assegura vantagens

relativamente ao método de duas etapas. No entanto, da revisão bibliográfica, observa-se que os investigadores preferem o método de duas etapas por ser simples e fácil (Subudhi e Kumar 2019). A Tabela 2.5 sumariza o trabalho de alguns investigadores relativamente à obtenção de nanofluidos.

Tabela 2.5: Método de obtenção de nanofluidos utilizados por diversos investigadores.

| Autor/Referências | Material das nanopartículas | Fluido base | Concentração (%) | Método |
|---------------------------|---|----------------------------------|------------------|-------------|
| (Tseng e Lin 2003) | TiO ₂ | Água | 0.05 - 0.12 | Duas etapas |
| (Liu et al. 2005) | MWCNT (<i>multiwall carbon nanotubes</i>) | Etilenoglicol e óleo de motor | 0.2 – 2 | Duas etapas |
| (Lo, Tsung, e Lin 2007) | Ag | Etilenoglicol e água desionizada | - | Etapa única |
| (Phuoc e Massoudi 2009) | Ag | Água desionizada | 0.01 | Etapa única |
| (Beck, Sun, e Teja 2007) | Al ₂ O ₃ | Etilenoglicol | 1 – 4 | Duas etapas |
| (J.-H. Lee et al. 2008) | Al ₂ O ₃ | Água | 0.01 – 0.3 | Duas etapas |
| (Choi, Yoo, e Oh 2008) | Al ₂ O ₃ | Óleo isolante | 0.5 – 4 | Duas etapas |
| (De Robertis et al. 2012) | Cu | Etilenoglicol | - | Etapa única |
| (Paul et al. 2012) | Ag | Água | - | Etapa única |

Dispersão das nanopartículas

Recentemente, investigadores propuseram que existe efeito da aglomeração das nanopartículas na condutividade térmica do nanofluido, (Evans et al. 2008) e (Prasher, Phelan, e Bhattacharya 2006), realçando que o aumento da condutividade térmica do nanofluido é função da agregação das nanopartículas. De acordo com este mecanismo, existe um determinado grau de agregação, o qual possibilita alcançar uma condutividade térmica

máxima, sendo que este grau se encontra distante do previsto para misturas homogêneas, tal pode ser observado na Figura 2. 27.

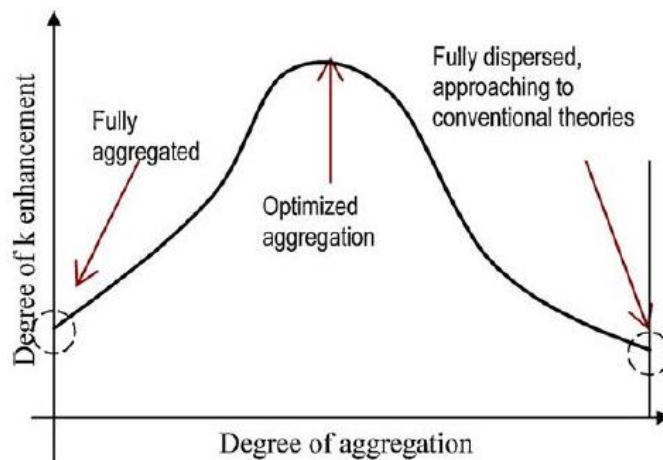


Figura 2. 27: Efeito da agregação de nanopartículas na condutividade térmica (Wen et al. 2009)

Este raciocínio exclui a condutividade térmica como sendo uma propriedade física inerente dizendo ainda que os aglomerados formados podem ser destruídos devido ao escoamento e às condições de temperatura, sendo que a validação destes argumentos requerem futura examinação meticulosa (Wen et al. 2009).

2.4 Estabilidade e dispersão dos nanofluidos

Para que os nanofluidos possam ser aplicados em qualquer tipo de processo, é necessário assegurar a sua estabilidade a longo prazo, caso contrário, a sua performance vê-se comprometida. Como estabilidade do nanofluido entenda-se como a capacidade do fluido em manter as suas características ao longo do tempo que, quanto mais longo, melhor. Da revisão bibliográfica, facilmente se conclui que a estabilidade de um nanofluido está fortemente relacionada com a dispersão das nanopartículas, uma vez que estas tendem aglomerar-se e, quando este fenómeno atinge certas proporções, perdem o seu propósito. É então fulcral, apurar os factos pelos quais as nanopartículas se agregam e consequentemente se sedimentam. Adicionalmente, deve-se ainda apurar quais os fatores que possivelmente determinam se um nanofluido é estável ou não, assim como compreender como é que um nanofluido se pode manter estável e num estado disperso (Mahbubul et al. 2016).

A estabilidade dos nanofluidos é um fenómeno que necessita caracterização, consequentemente, é importante analisar a microestrutura das nanopartículas para que se

possam estudar as características da dispersão coloidal, como é o caso do tamanho das partículas, da sua forma e da agregação. Como já foi abordado no Secção 2.3.5, o Potencial Zeta é capaz de quantificar, de certo modo, a estabilidade da suspensão.

De acordo com (Duangthongsuk e Wongwises 2009), existem três métodos eficientes para obtenção de suspensões estáveis, sendo estes o controlo do pH da suspensão, a adição de surfactantes e o uso de vibrações ultrassónicas. Todos estes métodos, visam promover alterações nas propriedades das superfícies das nanopartículas presentes, para que uma suspensão estável seja obtida (Mahbulul 2019c). Deve ser salientado o facto de que, quer se faça o controle do pH e/ou se adicione surfactante ou não, por forma a aumentar a estabilidade, de qualquer dos modos deve ser feita uma ultrassonificação, uma vez que esta é o principal fator na preparação e na estabilidade do nanofluido (Mahbulul 2019c). A Figura 2. 28 mostra, esquematicamente um exemplo de um nanofluido estável e de um não estável.

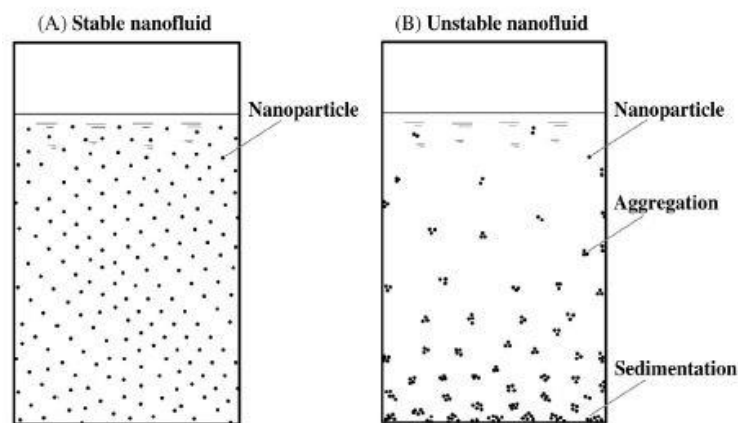


Figura 2. 28: Exemplo de um nanofluido estável e de um nanofluido não-estável: (A) suspensão coloidal estável e dispersa, e (B) suspensão coloidal não estável e não dispersa (Mahbulul 2019c)

2.4.1 Ultrassons

As nanopartículas, em vez de se dispersarem no nanofluido, tendem a se agregar devido à sua energia superficial, é então necessário recorrer à utilização de ultrassons capazes de quebrar a aglomeração e proporcionar a dispersão das nanopartículas no fluido. Surge assim a necessidade de saber qual a quantidade de tempo que as nanopartículas se devem encontrar em ultrassons por forma a que a energia superficial das mesmas seja ultrapassada e estas fiquem dispersas.

Seria de esperar que quanto maior o tempo que as nanopartículas estivessem sujeitas aos ultrassons, melhores seriam os resultados obtidos relativamente à sua dispersão. No entanto, isto não se verifica, como se pode observar na Tabela 2.6. É possível observar que

existem investigadores que defendem a existência de uma duração ótima para uma melhor dispersão e estabilidade que, não necessariamente, será a maior duração testada (Mahbubul 2019c).

Tabela 2.6: Conclusões retiradas por vários investigadores sobre o período ótimo de sujeição dos nanofluidos a ultrassons.

| Investigador/Referências | Nanofluido | Período de Sonificação | Investigação | Conclusão |
|-----------------------------------|--|------------------------|--|--|
| (Kwak e Kim 2005) | CuO – EG | 0 – 30 h | Tamanho dos aglomerados e potencial zeta | Período de 9 h é o ideal |
| (J.-H. Lee et al. 2008) | Al ₂ O ₃ – Water | 0 – 30 h | Potencial Zeta | Período de aproximadamente 5 h é o ideal |
| (V. S. Nguyen et al. 2011) | Al ₂ O ₃ – Water | 0 – 600 s | Tamanho dos aglomerados | Maior período possível é o ideal |
| (Kole e Dey 2012) | ZnO -Water | 4 – 100 h | Condutividade Térmica | Período de 60 h é o ideal |
| (Azadeh Ghadimi e Metselaar 2013) | TiO ₂ - DW | 0 – 15 min | - | Maior período possível é o ideal |
| (Sadeghi et al. 2015) | Al ₂ O ₃ – Water | 0 – 180 min | Distribuição do tamanho das partículas, Potencial Zeta e Condutividade Térmica | Maior período possível é o ideal |

Alguns investigadores observaram uma duração ideal para ultrassonificar e que está dependente de diversos parâmetros dos nanofluidos, como é o caso da concentração de partículas e o seu tipo, e da quantidade de fluido base (Kabir, Saha, e Jeelani 2007). No entanto, na Tabela 2.6 pode verificar-se que existem investigadores que defendem o contrário, reportando que quanto maior o tempo de ultrassonificação, melhores serão os resultados. Deve-se ainda salientar que estes investigadores foram os que usaram os menores tempos, facto pelo qual, possivelmente, não terão conseguido atingir a melhor dispersão possível. Conclui-se desta forma que não existe não um consenso relativamente ao tempo de

ultrassonificação, deste modo, não é possível apurar a existência de uma duração específica/comum capaz de gerar os melhores resultados possíveis (Mahbubul, Shahrul, et al. 2015). Pelo facto da ultrassonificação poder afetar muitos outros parâmetros, Figura 2. 29, é importante utilizar simultaneamente diferentes técnicas de avaliação, para que se obtenham boas conclusões (A. Ghadimi, Saidur, e Metselaar 2011).

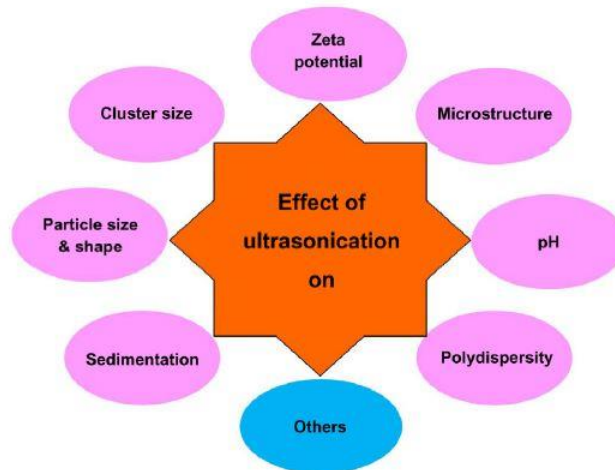


Figura 2. 29: Efeito da ultrassonificação em diferentes parâmetros dos nanofluidos (Mahbubul 2019c).

2.4.2 Microestrutura

Para que seja possível observar o efeito da duração dos ultrassons, é analisada a microestrutura da suspensão com recurso a um microscópio de transmissão de eletrões. Para o caso aqui exposto, o nanofluido utilizado é de Al_2O_3 com água com uma concentração de nanopartículas de 1%, e trata-se um trabalho de investigação de (Mahbubul, Shahrul, et al. 2015). Na Figura 2. 30 pode-se observar a microestrutura do nanofluido depois de agitado e sem recurso a ultrassons. Repare-se que é claro que as nanopartículas não se encontram devidamente dispersas e existem aglomerados de partículas o que leva à existência de espaços vazios, sem partículas.

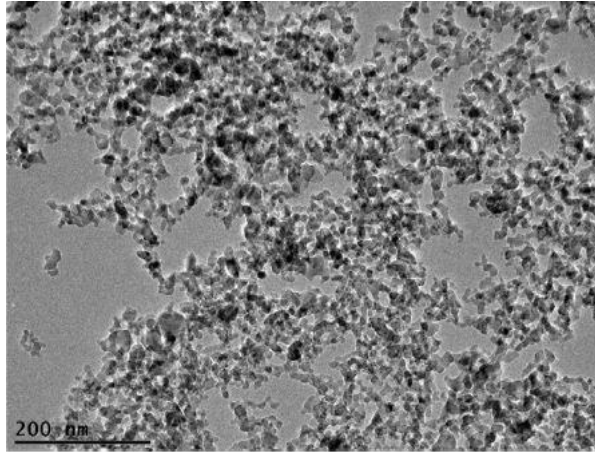


Figura 2. 30: Microestrutura de um nanofluido de Al₂O₃ com água preparado sem recurso a ultrassons (Mahbulul, Saidur, et al. 2015).

Para que os ultrassons fossem aplicados foi utilizada uma máquina com uma frequência de operação de 20 kHz e com uma potência máxima de 500 W. Na sua utilização, foram aplicadas amplitudes de 25% e 50% sendo que se ligava a máquina durante dois segundos seguindo dois segundos com a máquina desligada, sempre nesta cadência (Mahbulul, Saidur, et al. 2015). Esta abordagem é recomendada uma vez que seguindo um modo pulsado, retarda-se o aumento da temperatura do material que se pretende ultrassonificar e, deste modo, reduzem-se os resultados negativos (Taurozzi, Hackley, e Wiesner 2012).

Imagens da microestrutura do nanofluido depois de sujeito a 1h de ultrassons, recorrendo a duas amplitudes diferentes (25% e 50%, esquerda e direita, respetivamente) estão presentes na Figura 2. 31. Pela mesma, verifica-se que 1 h de ultrassonificação não é suficiente para que se obtenha um nanofluido devidamente disperso e, ainda, verifica-se que para uma amplitude de 50% os resultados obtidos demonstram uma melhor dispersão do que para uma amplitude de 25%. Conclui-se que para o mesmo tempo de ultrassonificação, quanto maior a potência dos ultrassons, maior será a dispersão das partículas, verificando-se menos agregação.

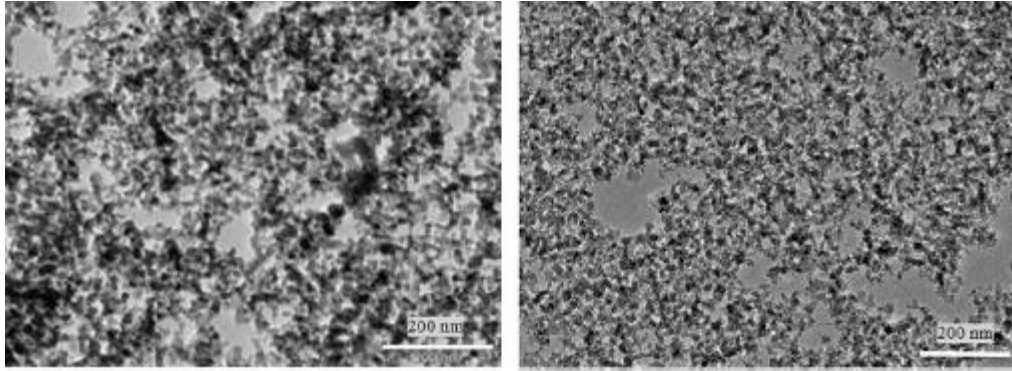


Figura 2. 31: : Microestrutura de um nanofluido de Al₂O₃ com água preparado com recurso a 1h de ultrassons (Mahbulul, Saidur, et al. 2015).

Imagens da microestrutura do nanofluido depois de sujeito a 2 h de ultrassons, recorrendo a duas amplitudes diferentes (25% e 50%, esquerda e direita, respetivamente) estão presentes na Figura 2. 32. Na mesma observa-se uma boa dispersão das nanopartículas, ainda que existam pequenos aglomerados, os quais não foram possíveis de serem quebrados. É necessário ter em atenção que não é possível manter o mesmo tamanho das partículas antes e depois de dispersas no fluido base (Begüm Elç loğ Lu e Okutucu-Özyurt 2016).

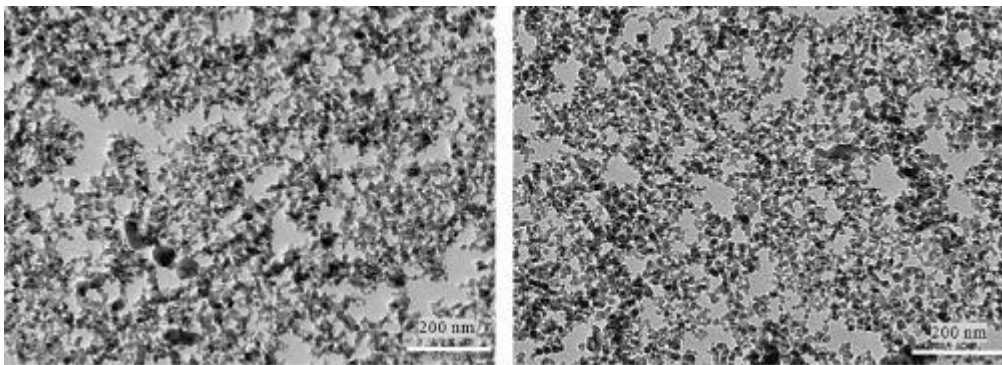


Figura 2. 32 : Microestrutura de um nanofluido de Al₂O₃ com água preparado com recurso a 2 h de ultrassons (Mahbulul, Saidur, et al. 2015).

Imagens da microestrutura do nanofluido depois de sujeito a 3 h de ultrassons, recorrendo a duas amplitudes diferentes (25% e 50%, esquerda e direita, respetivamente) estão presentes na Figura 2. 33. Aqui verifica-se uma melhor dispersão das partículas, já se observam menos espaços vazios. Ainda que não existam aglomerados de grandes dimensões, existem alguns nano-aglomerados cuja presença se deve ao facto de não ter sido fornecida energia suficiente para quebrar estes aglomerados. Não descartando a hipótese de ter surgido uma re-aglomeração, uma vez que com o aumento da energia fornecida, aumentam as colisões entre as partículas potenciando a que estas se enredem (Lam et al. 2005). Não

obstante, é preciso ter em atenção que é impossível quebrar completamente todos os aglomerados formados (A. Ghadimi, Saidur, e Metselaar 2011).

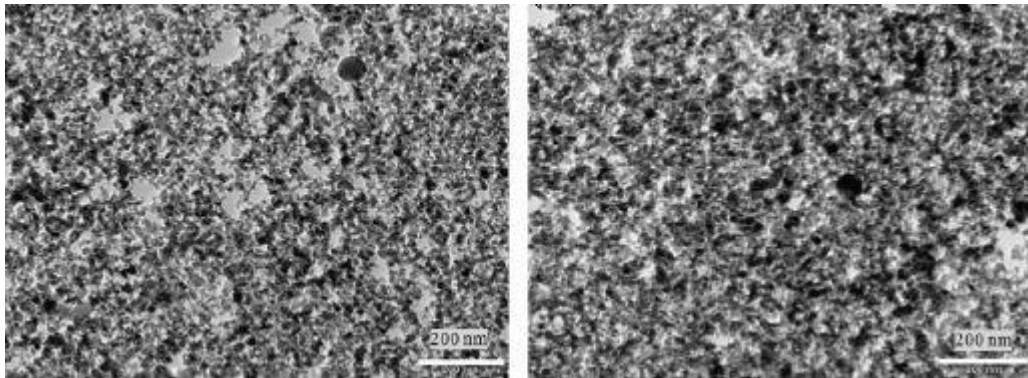


Figura 2. 33: Microestrutura de um nanofluido de Al_2O_3 com água preparado com recurso a 3 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

Imagens da microestrutura do nanofluido depois de sujeito a 4 h de ultrassons, recorrendo a duas amplitudes diferentes (25% e 50%, esquerda e direita, respetivamente) estão presentes na Figura 2. 34. Observa-se a presença de menos aglomerados, ainda que existam alguns, e uma melhor dispersão das nanopartículas, sendo que já não é possível observar espaços vazios para uma amplitude de 50%.

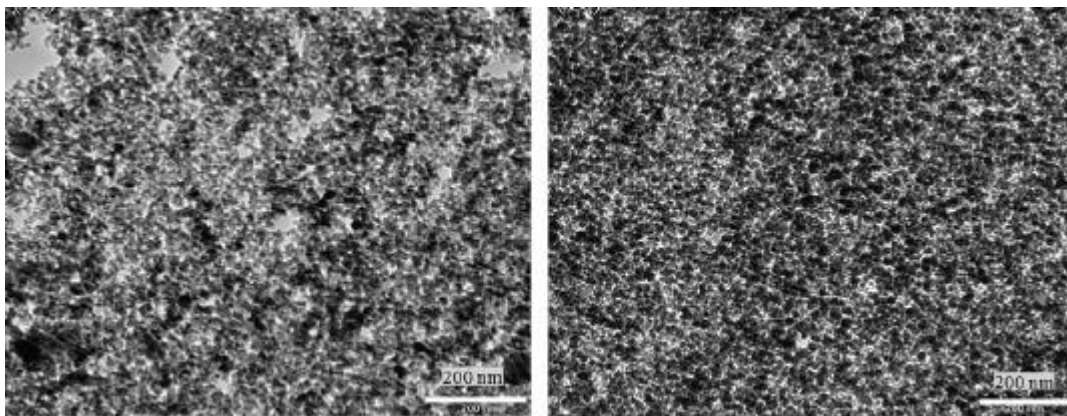


Figura 2. 34: Microestrutura de um nanofluido de Al_2O_3 com água preparado com recurso a 4 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015)

Imagens da microestrutura do nanofluido depois de sujeito a 5 h de ultrassons, recorrendo a duas amplitudes diferentes (25% e 50%, esquerda e direita, respetivamente) estão presentes na Figura 2. 35. Para 50% de amplitude, verifica-se uma elevada dispersão das partículas e os aglomerados apresentam-se de forma residual, enquanto que para a amplitude de 25% ainda existem algumas áreas vazias, pelo que se conclui que para esta amplitude, 5h de ultrassons não são o suficiente para que se atinga uma condição de elevada dispersão. Salienta-se ainda o facto da imagem para uma amplitude de 50 % ser mais escura,

o que se poderá dever a uma erosão do Sonificador resultante de uma contaminação por parte do nanofluido devido à ultrassonificação ter sido demasiado longa (Mandzy, Grulke, e Druffel 2005).

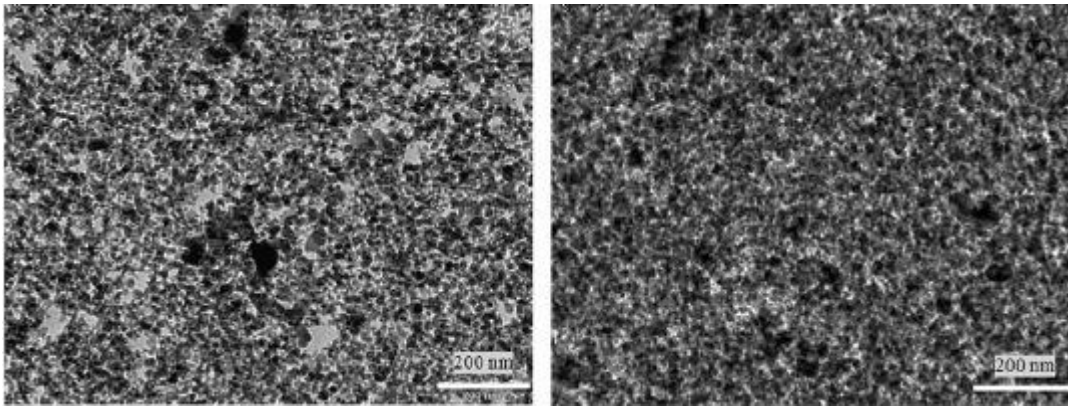


Figura 2. 35 Microestrutura de um nanofluido de Al₂O₃ com água preparado com recurso a 5 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015)

Em suma, os resultados obtidos para a amplitude de 50% são superiores aos obtidos para a amplitude de 25%, sendo que para 50%, 5 h de ultrassonificação são o suficiente para que se obtenha um nanofluido bem disperso.

Nos seguintes histogramas, Figura 2. 36, Figura 2. 37 e Figura 2. 38, encontra-se a distribuição do tamanho das partículas, medido no mesmo microscópio, para 0h, 1h e 2h de sonificação, respetivamente. Para 0h, os diâmetros variam entre 6nm e 20nm, representando o maior intervalo de diâmetros sendo que a média é 13nm. Ao fim de 1h de ultrassons, o intervalo reduziu-se, sendo que o diâmetro varia entre 5nm e 14nm, concluindo-se deste já que as partículas se encontram em menores dimensões relativamente às que não foram sujeitas a ultrassons. Com a aplicação de ultrassons, as nanopartículas começam a quebrar e a se erodirem (Özcan-Taşkin, Padron, e Voelkel 2009). Ao fim de 2h, o diâmetro das partículas encontra-se entre 8nm e 11nm e o maior diâmetro de nanopartícula encontrado é de 12nm, que é inferior ao tamanho médio aquando da falta de ultrassons.

Estado da arte dos nanofluidos

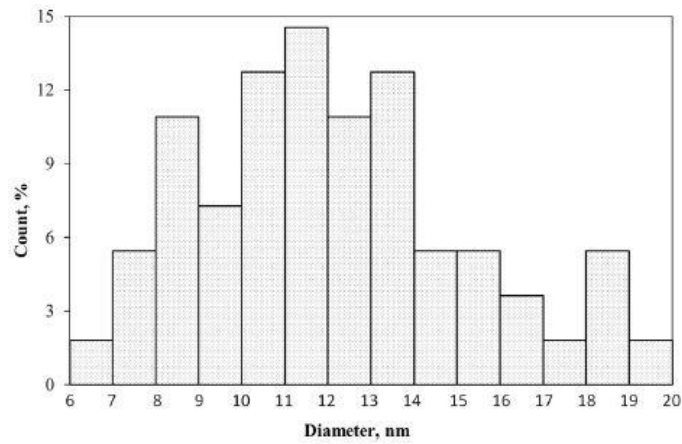


Figura 2. 36: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 0 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

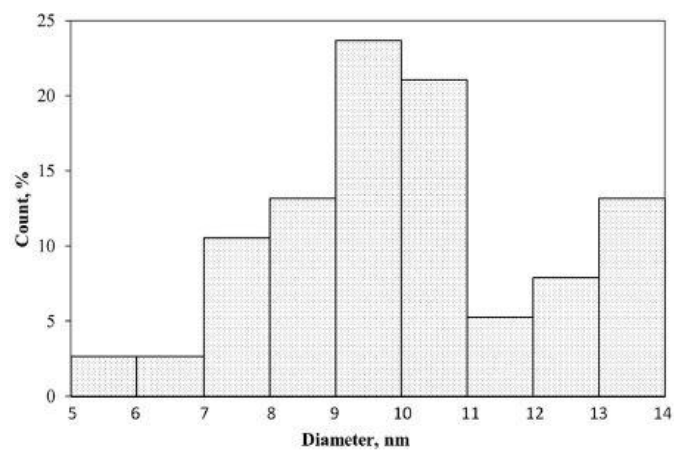


Figura 2. 37: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 1 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

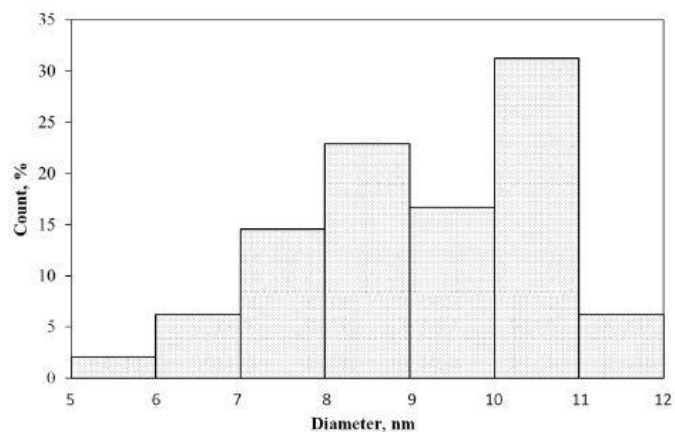


Figura 2. 38: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 2 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

Nos histogramas da Figura 2. 39, Figura 2. 40 e Figura 2. 41, encontra-se a distribuição do diâmetro das partículas, medido no mesmo microscópio, para 3h, 4h e 5h de sonificação, respetivamente. Aqui é notório que não existem diferenças relevantes entre os diâmetros das

nanopartículas para diferentes tempos sonificação, pelo que se conclui que até 3h de sonificação, existe uma diminuição do diâmetro das partículas e que a partir deste tempo não existe uma diminuição significativa no tamanho das nanopartículas.

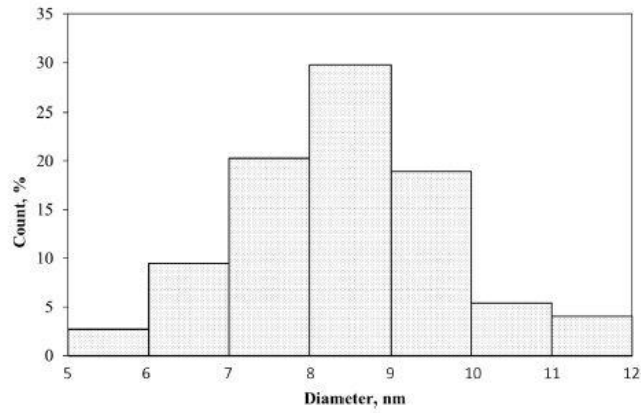


Figura 2. 39: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 3 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

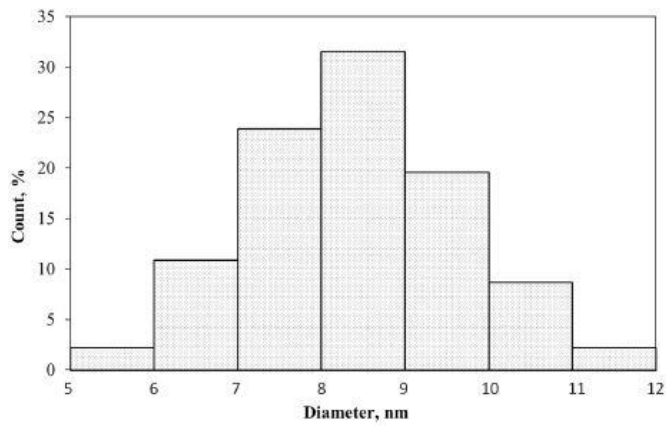


Figura 2. 40: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 4 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

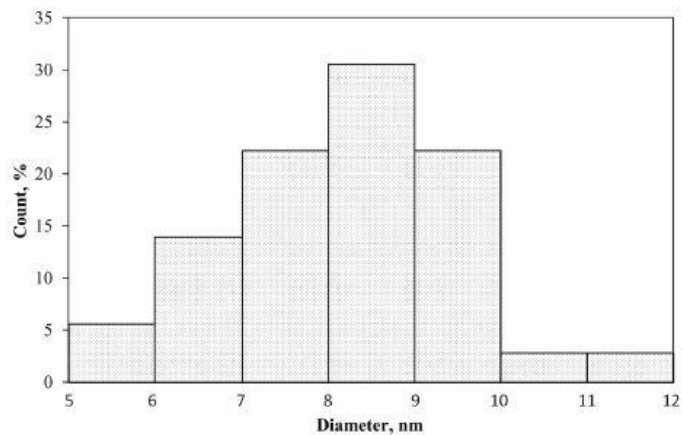


Figura 2. 41: Histograma dos diâmetros medidos para cada nanopartículas do nanofluido de Al₂O₃ com água, preparado com 5 h de ultrassons (Mahbubul, Saidur, et al. 2015).

Isto é facilmente observado no gráfico da Figura 2. 42, no qual se revela que com o aumento do tempo de sonificação, observa-se uma diminuição no tamanho médio das partículas. No entanto, a partir das 3h essa diminuição deixa de ser significativa.

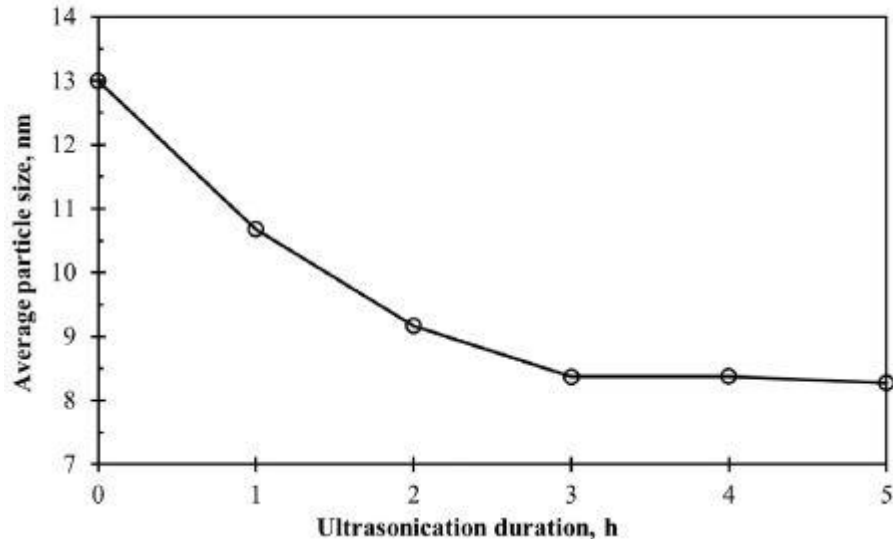


Figura 2. 42:Tamanho médio das partículas de Al₃O₃ após diferentes durações de exposição a ultrassons (Mahbubul 2019c)

Da bibliografia retira-se que o recurso a ultrassons desempenha um papel preponderante na estabilidade dos nanofluidos. Não obstante, o seu uso demasiado prolongado retira o seu interesse de duas maneiras. Em primeiro lugar, a partir de um determinado tempo de aplicação, o uso de ultrassons não promove a dispersão das nanopartículas na mesma quantidade que promove no início da aplicação, revelando-se assim um desperdício de energia. Em segundo lugar, como já foi dito anteriormente, o seu uso prolongado provoca a erosão do Sonificador e ainda existe a possibilidade de haver re-aglomeração das nanopartículas. Adicionalmente, deve-se salientar que períodos demasiados longos de exposição a ultrassons, refletem-se na cadência de produção de nanofluido, possibilitando a inviabilidade económica de produção destes.

2.4.3 Tamanho dos aglomerados

Uma vez que a presença de aglomerados é o principal fator de erosão de canais e do seu entupimento, criando a possibilidade de comprometer instalações e/ou processos, faz todo o sentido fazer uma abordagem ao tamanho dos mesmos. Utilizando tecnologia semelhante à anterior, (Mahbubul 2019c) conseguiu medir o tamanho dos aglomerados presentes em

amostras de um mesmo nanofluido, água com Al_2O_3 na concentração de 1%, sujeitas a diferentes tempos e amplitudes de sonificação. Os resultados estão expostos na Figura 2. 43.

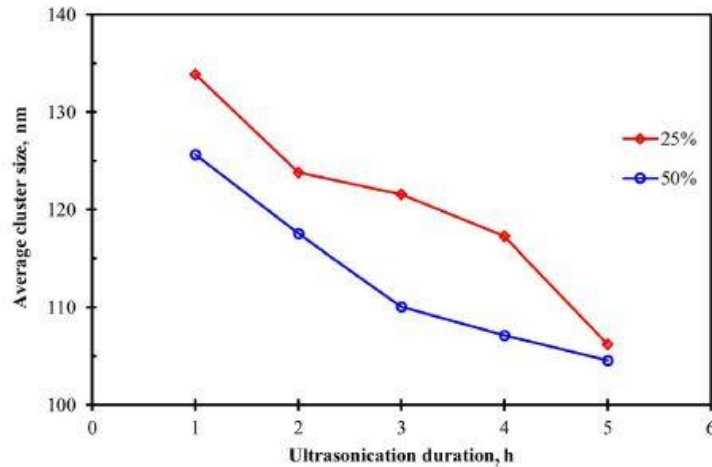


Figura 2. 43: Tamanho médio dos aglomerados de acordo com o tempo de ultrassonificação, para amplitudes de 25% e 50% (Mahbubul 2019c)

Do gráfico retira-se a informação que para maiores amplitudes, resultam menores aglomerados (partículas), sendo que ao fim de algum tempo, neste caso 5h, os resultados obtidos para o tamanho dos aglomerados para 25 % e 50 % de amplitude são semelhantes.

2.4.4 Potencial Zeta

O potencial Zeta representa o melhor método na avaliação das características de dispersão dos nanofluidos e do comportamento das nanopartículas. No entanto, este método é o que apresenta um maior custo associado, comparativamente a outras técnicas existentes (Sadeghi et al. 2015). Este aumenta com o aumento do tempo a que o nanofluido é submetido a ultrassons, sendo que a partir de um determinado intervalo de tempo, este aumento torna-se cada vez menos gradual até que estagna. Na Figura 2. 44, encontra-se presente informação obtida por três investigadores diferentes, relativa à variação do potencial Zeta de acordo com a duração a que o nanofluido foi submetido a ultrassons, incluindo a estratificação dos vários níveis de estabilidade existentes. Mais informações acerca do potencial Zeta encontram-se descritas na Secção 2.3.5.

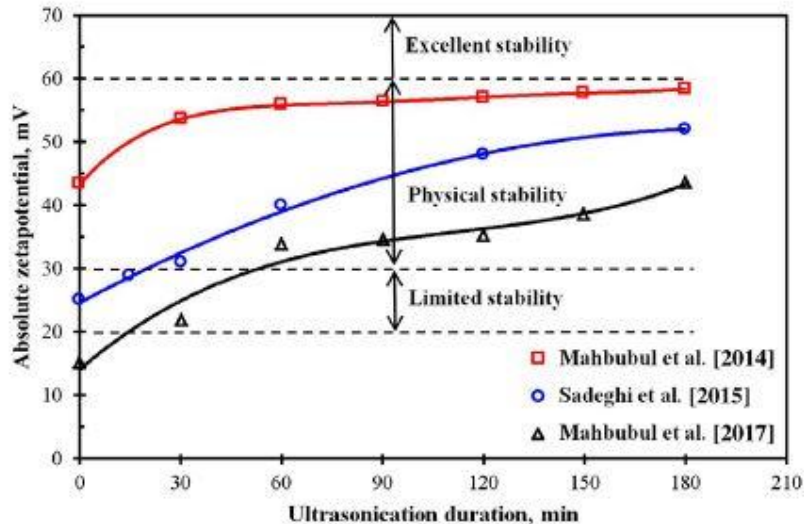


Figura 2. 44: Valores absolutos de potencial Zeta de acordo com o tempo a que o nanofluido foi sujeito a ultrassons (Mahbubul 2019c).

2.4.5 Surfactante

Com a utilização de surfactantes é possível melhorar a estabilidade das nanopartículas em soluções aquosas e por isso, revela-se como um dos métodos utilizados para evitar a sedimentação das nanopartículas. O surfactante atua modificando a superfície das nanopartículas de hidrofóbicas para hidrofílicas e vice-versa em líquidos não aquosos. O potencial zeta, por sua vez, aumenta devido à carga superficial nas nanopartículas suspensas no fluido base e, deste modo, aumentam também as forças de repulsão entre as nanopartículas (Hwang et al. 2007). É necessário ter em atenção a quantidade de surfactante aplicado, uma vez que doses inadequadas podem não fornecer o revestimento requerido para gerar repulsão electrostática e compensar as forças de atração de Van Der Waals (L. Jiang, Gao, e Sun 2003). Os surfactantes mais comumente utilizados são o Dodecil Sulfato de Sódio, Sulfonato de alquilbenzeno linear, ácido oleico, sal, entre outros. A escolha do surfactante mais indicado, revela-se como a parte mais importante do procedimento, sendo que a grande desvantagem associada ao uso de surfactantes reside no comprometimento do nanofluido quando utilizado em aplicações a elevadas temperaturas, acima dos 60°C, uma vez que a ligação entre o surfactante e as nanopartículas pode ficar danificada. Deste modo, o seu uso não é aconselhado para nanofluidos que operem acima dos 60°C, já que o nanofluido perde a sua estabilidade e aumenta a sedimentação das nanopartículas (X.-Q. Wang e Mujumdar 2007). Em termos futuros, é importante o desenvolvimento de surfactantes para utilização em nanofluidos que operem a elevadas temperaturas.

2.5 Desafios

Apesar do uso de nanofluidos numa extensa gama de aplicações parecer promissor, o seu desenvolvimento vê-se, de certo modo, com alguns entraves, devido à falta de homogeneidade de resultados obtidos por diferentes investigadores, à limitada caracterização das suspensões e do défice de conhecimento teórico relativamente aos mecanismos responsáveis pelas mudanças ocorridas nas propriedades. No que concerne à transferência de calor por convecção em nanofluidos, é de salientar a relevância da condutividade térmica, do movimento Browniano das partículas e da mudança de propriedades termofísicas de acordo com a temperatura, pelo que estudos experimentais relativos à transferência de calor em nanofluidos pela convecção são necessários. Atualmente ainda existe escassez de investigações com o foco no uso de nanofluidos como fluidos refrigerantes. Assim, é importante estudar o uso de nanofluidos em aplicações com transferência de calor em duas fases, por forma a que seja possível explorar a potencialidade de melhorar as características da transferência de calor nos evaporadores e condensadores utilizados em aplicações de refrigeração com recurso a ar-condicionado (Saidur, Leong, e Mohammad 2011).

Existem ainda outros desafios que devem ser investigados para que a utilização de nanofluidos de uma forma eficiente, eficaz e controlada seja possível, os quais estão a seguir expostos.

Queda de pressão e potência de bombagem

A queda de pressão e a potência de bombagem estão interligadas, sendo que a queda de pressão gerada durante o escoamento do nanofluido é um dos parâmetros que mais influencia a eficiência do nanofluido. De acordo com (Saidur, Leong, e Mohammad 2011), apenas existem duas propriedades do fluido capazes de influenciar a queda de pressão existente, sendo estas a viscosidade e a densidade, e as mesmas a potenciam. Este facto representa uma desvantagem da utilização de nanofluidos como fluido refrigerante, uma vez que nos mecanismos de refrigeração, existem etapas nas quais a pressão do fluido deve ser mantida constante. (Yu et al. 2007) e (J.-H. Lee et al. 2008) concluíram que a viscosidade dos nanofluidos é superior à do fluido base, assim como (Namburu et al. 2009) afirma que a densidade dos nanofluidos também é superior à do fluido base, suportando as afirmações

feitas anteriormente. Ambas as propriedades, densidade e viscosidade, são proporcionais à concentração de nanopartículas (Saidur, Leong, e Mohammad 2011).

Estabilidade das nanopartículas a longo prazo

Devido à agregação inevitável das nanopartículas, a preparação de uma suspensão que se mantenha homogênea ao longo do tempo, é um desafio técnico (Saidur, Leong, e Mohammad 2011). Para que a necessidade de manter uma suspensão homogênea seja satisfeita, torna-se necessário efetuar tratamentos químicos ou físicos à suspensão. Posto isto, vários tratamentos foram já abordados, como a adição de surfactantes, a modificação superficial das partículas suspensas e a aplicação de forças sobre os aglomerados de partículas presentes na suspensão. O excesso de surfactantes tem como consequência um efeito prejudicial na viscosidade, nas propriedades térmicas e na estabilidade química dos nanofluidos, pelo que o seu uso deve ser controlado (Choi, Yoo, e Oh 2008).

A estabilidade das nanopartículas a longo prazo é, de um modo geral, uma das necessidades existentes na aplicação dos nanofluidos. As teorias convencionais defendem que a estabilidade dos nanofluidos apresenta correspondência com o aumento da condutividade térmica, e que quanto melhor for a dispersão das nanopartículas, maior será a condutividade térmica que o fluido apresenta. No entanto, (Wen et al. 2009) afirma algo diferente, reconhecendo existir um nível de aglomeração, diferente do assumido para uma suspensão homogênea, que suscita uma condutividade térmica máxima, como já foi referido anteriormente. A Figura 2. 45 mostra precisamente o efeito da falta de estabilidade de um nanofluido de Al_2O_3 , sendo que praticamente todas as suas nanopartículas se encontram depositadas ao fim de apenas sete horas.

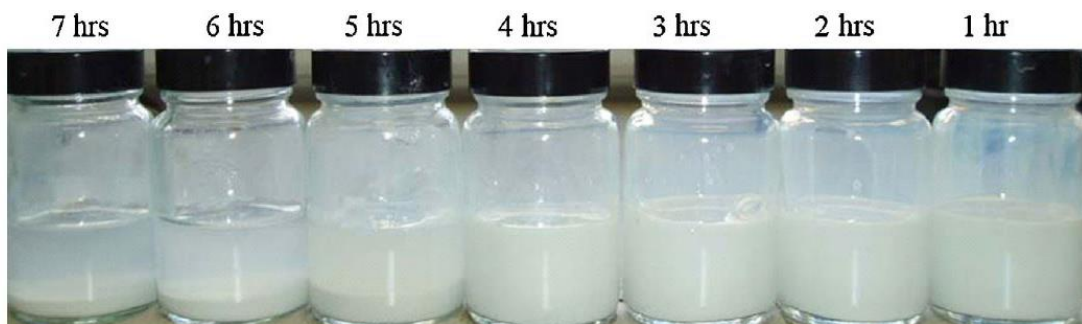


Figura 2. 45: Amostras de nanofluidos de Al_2O_3 , sem qualquer tipo de estabilizador, nas quais é possível observar a mudança da estabilidade da suspensão com o tempo (Wen et al. 2009).

Viscosidade

Com o aumento da concentração acentua-se o movimento Browniano e, deste modo, conseguem-se atingir condutividades térmicas superiores. Não obstante, é fulcral ter em atenção que o aumento da concentração não pode ser ilimitado (Wu et al. 2009), uma vez que com o aumento da concentração dá-se um aumento da viscosidade do nanofluido, negligenciando a condutividade térmica pela diminuição do movimento Browniano e aumentando a potencia necessária para bombagem.

Custo elevado

Existem duas maneiras pelas quais os nanofluidos podem ser produzidos e em ambas os custos são elevados, uma vez que requerem a utilização de equipamento sofisticado, facto pelo qual a aplicação de nanofluidos em processos encontra-se ainda numa fase embrionária (J. Lee e Mudawar 2007). É, portanto, importante que a tecnologia utilizada na produção de nanofluidos sofra inovações no sentido de a tornar mais acessível.

Associado ao custo elevado encontra-se também as dificuldades presentes nos processos de produção de nanofluidos. Os tipos de produção existentes envolvem reações de redução ou de troca de iões. Além disso, os fluidos base contêm outros iões e produtos de reação que por sua vez são difíceis ou até mesmo impossíveis de separar do fluido. Existem ainda outros problemas, como é a formação de aglomerados já exposta neste trabalho. (S. K. Das 2006) sugere que a única forma segundo a qual os nanofluidos poderão ser devidamente utilizados em aplicações no futuro, passa por reunir conhecimentos multidisciplinares, reunindo conhecimentos de química, de energia térmica, de materiais e de física.

Baixo calor específico

Da literatura existente é possível constatar que o calor específico dos nanofluidos é mais baixo que o do fluido base (Saidur, Leong, e Mohammad 2011), o que representa um entrave. Uma vez que um dos principais âmbitos de aplicações dos nanofluidos é a remoção de calor, o interesse reside em existir nanofluidos com elevados valores de calor específico associados a condutividades térmicas também estas elevadas. O que acontece é que sendo as nanopartículas possuidoras de calores específicos baixos, quando dispersas num fluido base (ainda que com elevado calor específico), dão origem a um nanofluido cujo calor específico se assemelha mais ao calor específico das nanopartículas do que ao do fluido base.

Desempenho dos nanofluidos quando em escoamento turbulento

Existe, ainda falta de consenso relativamente ao desempenho dos nanofluidos quando estes escoam em regime turbulento. Enquanto alguns investigadores alegam existir correspondência entre o regime de escoamento e o coeficiente de transferência de calor, no entanto é possível encontrar investigações que provam o contrário por apresentarem resultados contraditórios. Kim et al. observou não existir melhoria alguma no coeficiente de transferência de calor por convecção em nanofluidos de carbono amorfo e em regime turbulento, ao contrario do verificado para o regime laminar (Kim, Kang, e Choi 2007). O coeficiente de transferência de calor por convecção aumenta de acordo com o número de Reynolds. No entanto, em regime laminar verifica-se já entupimento e erosão dos canais por onde o nanofluido escoar, o que no caso do regime turbulento intensificar-se-á, levando à posterior diminuição deste coeficiente. Surge então a necessidade de determinar o número de Reynolds adequado, o que variará de acordo com a concentração e tipo das partículas e com o tipo de aplicação.

Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos necessita ser determinada ou calculada, para que os estudos da transferência de calor com nanofluidos sejam possíveis de se efetuar. Para tal existem diversos modelos através dos quais a condutividade térmica pode ser calculada, alguns destes modelos são abordados na Secção 5. Esta pode ainda ser determinada experimentalmente, no entanto os equipamentos existentes para tal tarefa apresentam custos elevados. Na Figura 2. 46, é possível observar a percentagem de publicações existentes, relativamente a alguns métodos experimentais utilizados para medir a condutividade térmica de nanofluidos.

Estado da arte dos nanofluidos

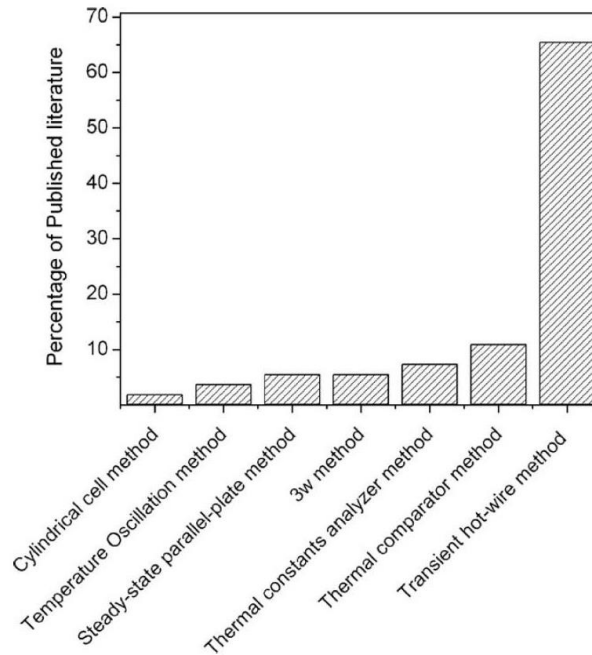


Figura 2. 46: Percentagem de publicações existentes, relativamente a alguns métodos experimentais utilizados para medir a condutividade térmica de nanofluidos. (Paul et al. 2010).

Assim, torna-se interessante desenvolver processos mais simples e com custos reduzidos, capazes de determinar experimentalmente a condutividade térmica dos nanofluidos. Deve-se ainda salientar de que a condutividade térmica dos nanofluidos se assemelha mais com a condutividade do fluido base do que com a condutividade das nanopartículas. Deste modo, ainda que com nanopartículas de elevado valor de condutividade térmica, por existir uma maior influencia por parte do fluido base, o nanofluido resultante apresenta uma condutividade térmica mais próxima da do fluido base.

2.6 Produção de nanopartículas

Os nanofluidos são uma solução de partículas sólidas à escala nanométrica, dispersas num fluido base. Como tal, quer o fluido base, quer as nanopartículas, desempenham papéis preponderantes naquilo que é o nanofluido. Deste modo, torna-se fulcral abordar as características do fluido base, mas principalmente das nanopartículas, uma vez que são estas que apresentam a maior influencia no comportamento do nanofluido.

Neste capítulo, serão expostas considerações referentes às nanopartículas de um modo geral, nomeadamente à sua estabilidade e dispersão no fluido base, assim como considerações referentes às nanopartículas utilizadas nos ensaios experimentais deste trabalho. Assim, será apresentado o processo de obtenção das nanopartículas utilizadas, as suas propriedades inerentes e alguns cuidados a ter por forma a incrementar a estabilidade do nanofluido.

Protocolo para síntese de nanopartículas de Fe_3O_4

A co-precipitação baseia-se numa reação química desencadeada pela adição de um agente precipitador (hidróxido de amónia) a um banho de sais de ferro e, deste modo, desencadeando a precipitação de um elevado número de partículas sólidas, sendo este o procedimento utilizado para obtenção das nanopartículas de óxido de ferro.

A metodologia utilizada não tem associada a produção de componentes tóxicos, é simples e apresenta um custo reduzido.

Não obstante, a estabilidade dos nanofluidos cujas nanopartículas provêm deste tipo de metodologia, vê-se bastante comprometida pelo facto de serem obtidos em duas fases: síntese das partículas, seguida de diluição num fluido base. Entre a síntese das partículas e a posterior diluição encontram-se os estágios intermédios de secagem e armazenamento, que são os principais responsáveis pela formação de aglomerados. Quer pela adição de agentes estabilizadores, quer pelo recurso a ultrassons, ou ainda pelo uso comum dos dois, consegue-se contradizer esta formação de aglomerados, aumentando a dispersão das nanopartículas.

Para a síntese das nanopartículas, inicialmente contou-se com 3,62g de Fe_3 , Figura 2. 47, e 1,33g de Fe_2 , Figura 2. 48, que serão diluídos em 100 ml de água destilada, e misturados com recurso a um agitador mecânico.

Produção de nanopartículas



Figura 2. 47: Fe3



Figura 2. 48: Fe2

Tendo já o banho de sais ferríticos preparado, é necessário preparar uma solução precipitadora de hidróxido de amónia (base forte), Figura 2. 49, que será adicionada ao banho de sais ferríticos, na quantidade de 6 ml.

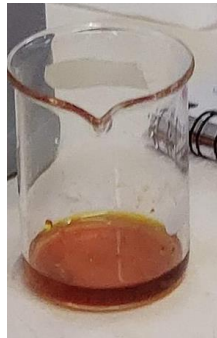


Figura 2. 49: Solução precipitadora de hidróxido de amónia.

Esta solução precipitadora deverá ser adicionada à solução de sais gota-a-gota por forma a promover uma reação homogénea, sendo que é da interação entre estas duas soluções resulta a formação de partículas.



Figura 2. 50: Solução de sais ferríticos após adição da solução precipitadora.

Produção de nanopartículas

Esta reação é exotérmica, facto pelo qual é libertada energia sob a forma de calor e, adicionalmente, são libertados fumos, pelo que este procedimento terá que ser realizado num hote de fluxo laminar.

No final deste procedimento, já é notória a presença de magnetite perceptível pela mudança de cor da solução, variando esta de castanho (solução de sais ferríticos) a preto (cor característica das partículas de óxido de ferro). Esta mudança de cor é possível ser observada na Figura 2. 51.



Figura 2. 51: Na figura mais da esquerda está presente apenas a solução de sais ferríticos à qual se adicionou a solução precipitadora. À sua direita, já é notória a mudança de cor, consequência da adição do hidróxido de amónia. A imagem da direita representa já a solução final contendo as nanopartículas. Deve-se ainda reparar que na solução final se pode ver a presença de vapores, fruto da reação ser exotérmica (Rocha 2018).

Seguidamente, é necessário efetuar a lavagem das partículas por forma a remover resíduos originários da reação e também a tornar o pH das mesmas o mais próximo possível do neutro. Para esta etapa, é utilizado um íman que, pelo facto das nanopartículas serem magnéticas, permite a migração das partículas facilitando a sua separação. Quantas mais foram as lavagens efetuadas, melhor será o resultado.



Figura 2. 52: Visualização da migração das nanopartículas magnéticas, durante a lavagem, pela utilização de vários ímanes.

Produção de nanopartículas

Finalmente, procede-se à secagem das nanopartículas com recurso a uma mufla. Estas devem ser mantidas na mufla à temperatura de 60°C, pelo menos durante 24 horas. Ao fim do período de secagem, obtém-se um aglomerado de nanopartículas que deve ser esmagado com recurso a um almofariz. O produto final é um pó composto por nanopartículas magnéticas, Figura 2. 53, que já se encontram prontas para serem utilizadas na obtenção de nanofluidos.



Figura 2. 53: FeO3 armazenado num tubo de ensaio (Rocha 2018).

3. ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM A UTILIZAÇÃO DE NANOFLUIDOS

Um permutador de calor caracteriza-se por ser um dispositivo utilizado para transferir calor, ou seja, a sua função é a de promover troca de energia entre dois fluidos que se encontram a temperaturas diferentes, sem que para isso ocorra mistura dos mesmos. Existem inúmeros dispositivos que se enquadram nesta definição, como é o caso dos frigoríficos domésticos, qualquer superfície alhetada ou *chillers*. Apesar de análogos, os dissipadores de calor divergem dos permutadores, pelo facto da sua função de remoção de calor ser mais detalhada uma vez que está inerente a utilização de um fluido de transporte capaz de levar a carga esta remoção. Este tipo de dispositivos pode apresentar vários tipos de geometria, como é o caso de possuir superfícies alhetadas ou canais capazes de direccionar o escoamento, tal pode ser observado na Figura 3. 1.

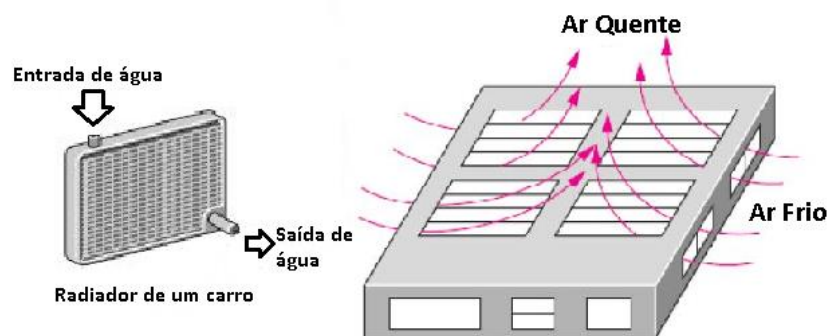


Figura 3. 1: Radiador de um carro com superfície alhetada e dispositivo com canais de ventilação (Cengel Yunus 2003)

Nos dissipadores de calor pode ainda ser necessário recorrer à utilização de líquidos, Figura 3. 2.

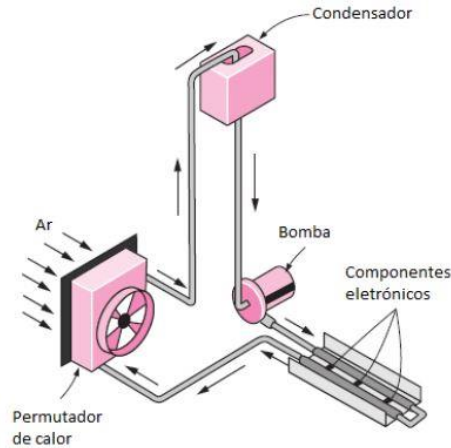


Figura 3. 2 Exemplo de um dissipador de calor com utilização de líquido (Cengel Yunus 2003)

Neste trabalho, para efeitos de estudo, utilizou-se apenas um tubo de alumínio, de secção quadrada, o qual estará em contacto com uma resistência térmica pela sua face inferior e termicamente isolado nas restantes. As dimensões relativas ao tubo utilizado encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dimensões do tubo utilizado nos ensaios experimentais.

| Dimensões do Tubo | |
|-----------------------|-----|
| Largura exterior (mm) | 8 |
| Espessura (mm) | 1 |
| Comprimento (mm) | 475 |

Inicialmente fez-se uma abordagem utilizando apenas água destilada e só posteriormente se utilizou um nanofluido de Fe_3O_4 com água destilada, com uma concentração de 0,2%.

Predominantemente, neste tipo de situações, o mecanismo segundo o qual ocorre a maioria da transferência de calor é a convecção e, como tal, a análise à transferência de calor rege-se-á segundo os seus princípios. De acordo com a Equação (3), os fatores que influenciam a transferência de calor por convecção são o coeficiente de transferência de calor por convecção, a área superficial e a diferença da temperatura entre o fluido e a superfície.

Relativamente às propriedades termofísicas da água, das nanopartículas e do nanofluido utilizado, estas encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades termofísicas da água, das nanopartículas e do nanofluido utilizado.

| Propriedade | Água | Nanofluido Fe ₃ O ₄ (0,2%) | Nanopartículas Fe ₃ O ₄ |
|-------------------------------------|----------|---|---|
| Condutividade Térmica (w/mk) | 0,606 | 0,6183 | 6 |
| Calor Específico (J/kg) | 4181 | 3896,00 | 670 |
| Viscosidade (Pa·s) | 0,000959 | 0,000984 | - |
| Massa Volúmica (kg/m ³) | 998,004 | 1046,12 | 5810 |

No caso da água, as suas propriedades encontram-se tabeladas e os valores foram obtidos a partir das respetivas tabelas presentes em Touloukian 1970, para uma temperatura de 295K. Relativamente às propriedades do nanofluido, estas foram obtidas através de modelos teóricos. As propriedades das nanopartículas foram obtidas a partir de (Syam Sundar, Singh, e Sousa 2013). Assim, para a determinação da condutividade térmica do nanofluido utilizou-se a Equação (4), do calor específico a Equação (16), da viscosidade a Equação (14), e da massa específica a Equação (17).

3.1 Análise Teórica ao Coeficiente de Transferência de calor por Convecção

A primeira abordagem efetuada foi uma análise teórica, sendo apenas necessário ter conhecimento das propriedades térmicas do fluido em questão, das dimensões do tubo por onde escoar o fluido, do regime de escoamento e do caudal utilizado.

Começou-se por determinar o número de Prandtl através da Equação (19) e o número de Reynolds através da Equação (20).

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (19)$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (20)$$

Na equação (19) e na equação (20), U representa a velocidade de escoamento, D o diâmetro interior do tubo, k a condutividade térmica do fluido em questão, μ representa a viscosidade dinâmica e C_p representa o calor específico. Relativamente ao número de Reynolds, através deste, verifica-se que em todos os ensaios realizados, o escoamento realizou-se em regime laminar, uma vez que o maior valor obtido foi de 0,37 (ver Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Regime de escoamento de acordo com o Re.

| Número de Reynolds | Regime de Escoamento |
|---------------------|----------------------|
| $Re < 2300$ | Regime Laminar |
| $2300 < Re < 10000$ | Regime de Transição |
| $Re > 10000$ | Regime Turbulento |

Com estes dois números determinados, é possível determinar o número de Nusselt. O número de Nusselt é adimensional e, de um modo geral, tratando-se de convecção forçada, é função do número de Reynolds e de Prandtl que, por sua vez, também são números adimensionais e juntos caracterizam o escoamento de um fluido. Para se determinar o número de Nusselt recorre-se a correlações obtidas experimentalmente e de acordo com o escoamento em questão. No entanto, para o caso de estudo em questão, o número de Nusselt encontra-se tabelado e considerou-se um escoamento laminar totalmente desenvolvido. Deste modo, o número de Nusselt depende apenas da geometria da secção do tubo.

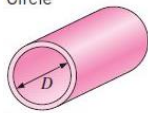
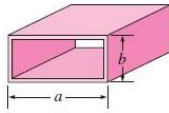
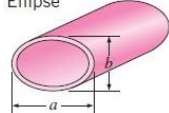
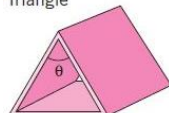
| Tube Geometry | a/b or θ° | Nusselt Number | | Friction Factor f |
|--|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| | | $T_s = \text{Const.}$ | $\dot{q}_s = \text{Const.}$ | |
| Circle  | — | 3.66 | 4.36 | $64.00/Re$ |
| Rectangle  | a/b | | | |
| | 1 | 2.98 | 3.61 | $56.92/Re$ |
| | 2 | 3.39 | 4.12 | $62.20/Re$ |
| | 3 | 3.96 | 4.79 | $68.36/Re$ |
| | 4 | 4.44 | 5.33 | $72.92/Re$ |
| | 6 | 5.14 | 6.05 | $78.80/Re$ |
| | 8 | 5.60 | 6.49 | $82.32/Re$ |
| ∞ | 7.54 | 8.24 | $96.00/Re$ | |
| Ellipse  | a/b | | | |
| | 1 | 3.66 | 4.36 | $64.00/Re$ |
| | 2 | 3.74 | 4.56 | $67.28/Re$ |
| | 4 | 3.79 | 4.88 | $72.96/Re$ |
| | 8 | 3.72 | 5.09 | $76.60/Re$ |
| 16 | 3.65 | 5.18 | $78.16/Re$ | |
| Triangle  | θ | | | |
| | 10° | 1.61 | 2.45 | $50.80/Re$ |
| | 30° | 2.26 | 2.91 | $52.28/Re$ |
| | 60° | 2.47 | 3.11 | $53.32/Re$ |
| | 90° | 2.34 | 2.98 | $52.60/Re$ |
| 120° | 2.00 | 2.68 | $50.96/Re$ | |

Figura 3. 3: Imagem contendo tabela referente ao número de Nusselt de acordo com a geometria da secção do tubo e do tipo de transferência de calor em questão (Cengel Yunus 2003).

De acordo com a Figura 3. 3, tratando-se de um tubo com geometria retangular e sabendo que a transferência de calor é por intermédio de uma superfície a temperatura constante, o número de Nusselt para este caso de estudo será 2,98.

De acordo com a análise feita acerca do número de Nusselt, (Tuckerman e Pease 1981) suportam as constatações referidas, relacionando o coeficiente de transferência de calor por convecção, h , com a condutividade térmica do fluido, k , e com o diâmetro (ou diâmetro hidráulico), D , da geometria que compõe o canal ou canais.

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} \leftrightarrow h = \text{Nu} \frac{k}{D} \quad (21)$$

Relativamente ao número de Nusselt, a partir do momento em que o escoamento se torna totalmente desenvolvido, este pode-se considerar constante, pelo que a maximização do coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser atingida pelo aumento da condutividade térmica do fluido de transporte, ou pela diminuição do diâmetro.

Deste modo é possível determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção teórico para o caso da água. Na determinação deste mesmo coeficiente para o caso dos nanofluidos, não existe diferença no método a utilizar, no entanto, as propriedades termofísicas dos nanofluidos têm de ser determinadas anteriormente, de acordo com as respetivas formulações.

Este estudo teórico foi então efetuado para dois fluidos diferentes, sendo estes: água e um nanofluido de Fe_3O_4 com água, com uma concentração de 0,2%. O coeficiente de transferência de calor por convecção é função de apenas do número de Nusselt, da condutividade térmica e do diâmetro da conduta, sabendo que o número de Nusselt é constante, para um mesmo fluido e utilizando sempre o mesmo tubo, este coeficiente será também constante. Como tal, através da Equação (21), estima-se que para o caso da água, este coeficiente apresenta o valor de 300,98 W/m²K e, para o caso no nanofluido utilizado, 307,11 W/m²K.

3.2 Análise Experimental ao Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Sabendo desde já que neste estudo o mecanismo de transferência de calor predominante é a convecção, o que se pretende determinar é o coeficiente de transferência de calor por convecção que, juntamente com a área superficial, com as temperaturas de

entrada e saída do fluido e da resistência térmica, representam os fatores com maior influencia na transferência de calor.

3.2.1 Fluidos utilizados

Nos ensaios experimentais foram apenas utilizados dois fluidos diferentes: água e um nanofluido de Fe_3O_4 em água destilada, com a concentração de 0,2%.

Relativamente ao nanofluido, este foi obtido por um processo de etapa única, sendo que produção de nanopartículas e a sua dispersão no fluido base ocorre ao mesmo tempo. Deste modo, o nanofluido foi obtido de forma muito simples, usando um método hidrotérmico para obtenção das nanopartículas, seguido da suspensão das mesmas em água. O protocolo usado é baseado em (Kolen'ko et al. 2014), e consiste na mistura dos sais de ferro, com água e ácido poliacrílico (responsável pelo revestimento das nanopartículas, o que as torna hidrofílicas), e adicionando uma solução de hidróxido de amónio. De seguida, este preparado é colocado e fechado num reator, sendo submetido 150°C durante 24h. A solução obtida é depois diluída com acetona, de forma a poder separar as nanopartículas do sobrenadante, sendo posteriormente as partículas são suspensas em água, obtendo-se desta forma o nanofluido. Sendo que o nanofluido é muito concentrado e não apresenta a concentração pretendida, é necessário proceder a uma diluição até que este apresente a concentração de 0,2%.

Sendo o processo de obtenção do nanofluido de etapa única, este, garante melhores propriedades do nanofluido, uma vez que se exclui os processos de secagem, armazenamento e transporte das nanopartículas.

O processo de funcionalização através de um ligante hidrofílico (neste caso, ácido poliacrílico) é fundamental, pois uma vez que as nanopartículas são magnéticas, estas apresentam uma alta energia superficial e interações hidrofóbicas, causando deste modo aglomeração e rapidamente se sedimentam quando na presença de um fluido base (Rodrigues et al. 2016).

3.2.2 Milicanal utilizado neste estudo

Para os ensaios experimentais realizados foi utilizado um tubo quadrado de alumínio com 8mm de lado e 1mm de espessura. Este tubo, por si só, não permite o encaixe de pontas de seringa nem de tubos redondos, uma vez que é quadrado. Como tal, foi necessário realizar

ajustes para que fosse possível encaixar tubos redondos sem que a estanquicidade se veja comprometida. Para tal, fixou-se a ponta de uma válvula de três vias a uma das extremidades do tubo e, colocou-se um prego na ponta até entrar no interior do tubo quadrado. Seguidamente, colocou-se todo este conjunto dentro de uma seringa com a extremidade fechada, vazando-se, de seguida, o PDMS. Esta estrutura foi segurada por grampos de suporte e por um suporte de tubos. Figura 3. 4.

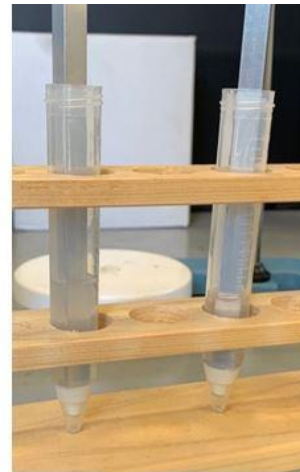
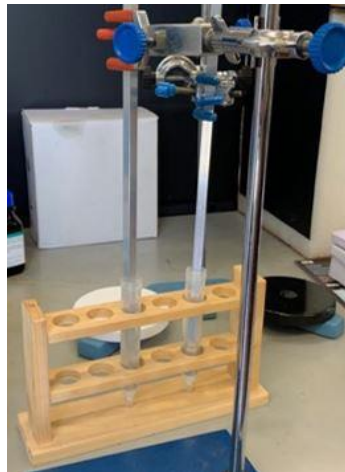


Figura 3. 4: Visualização da estrutura de suporte necessária para a adaptação do tubo aos ensaios experimentais a realizar.

Após 24h, o PDMS solidificou-se possibilitando assim a remoção do prego. Na Figura 3. 5 e na Figura 3. 6, é possível observar o conjunto do tubo com PDMS.

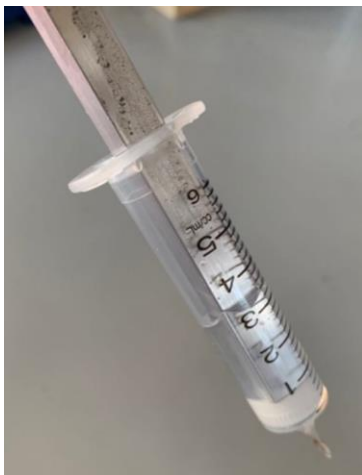


Figura 3. 5: Aspeto dos preparativos para alteração ao tubo após 24h. O PDMS já se encontra solidificado.



Figura 3. 6: Conjunto do tubo e PDMS fora da seringa, ainda com o parafuso.

Por forma a obter o conjunto final, foi retirado o tubo interior da seringa, cuidadosamente, para não danificar o PDMS e, posteriormente, foi retirado o prego. Assim, foi possível obter um tubo quadrado com uma ponta de uma válvula de três vias acoplada a

Estudo da transferência de calor com a utilização de nanofluidos

uma das extremidades, com a capacidade de realizar escoamentos sem problemas de estanquicidade.

3.2.3 Materiais e equipamentos utilizados

Para o presente trabalho foi utilizada a instalação exposta na Figura 3. 7.

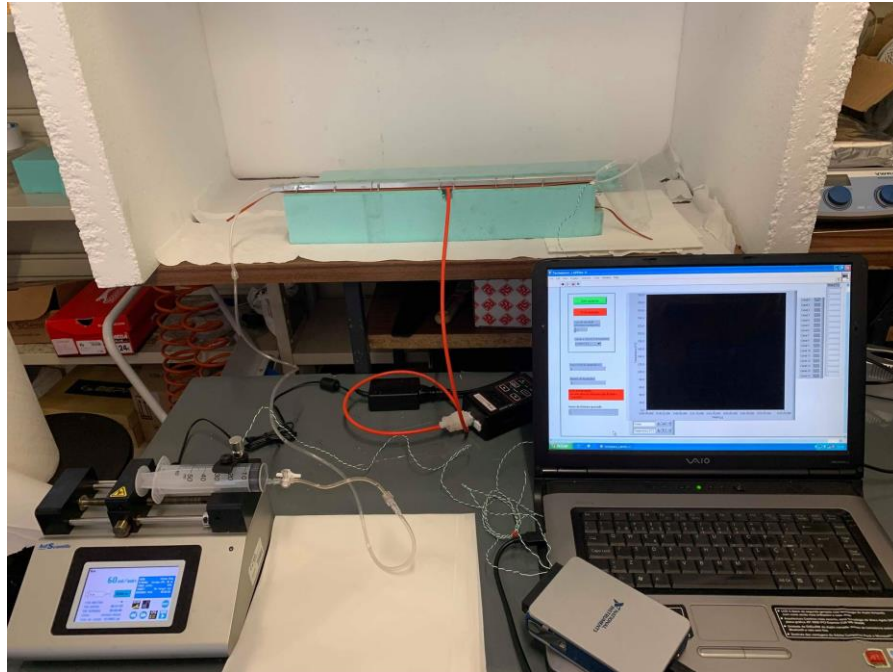


Figura 3. 7: Instalação utilizada no laboratório de energia e fluidos para realizar os ensaios experimentais.

Nesta instalação é possível observar um bloco de poliuretano, sobre o qual está uma resistência térmica (fita de aquecimento), regulada por um controlador de temperatura (HEATER-KIT-5SP, New Era). Por cima da resistência foi colocado o tubo de alumínio por onde escoam os fluidos. Este bloco de poliuretano, serve não só de apoio à resistência térmica, mas também ao tubo. Adicionalmente, tem a finalidade de minimizar possíveis perdas de calor por condução. Na entrada e saída do tubo foi colocado um termopar, por forma a medir a temperatura do *inlet* e a do *outlet*, sendo que ambos estão conectados a uma placa de aquisição de dados. Na Figura 3. 8 é possível observar o modo como o termopar do *outlet* foi colocado.



Figura 3. 8: Colocação do termopar à saída do tubo para medir a temperatura do outlet.

O caudal foi controlado com recurso a uma bomba de seringa (*KD Scientific Legato 100*) e utilizando seringas *Terumo* de 60ml.

Por forma a minimizar ao máximo as perdas por convecção, todo o tubo foi isolado com poliuretano que apresenta apenas uma cavidade interior para possibilitar a introdução do tubo (ver Figura 3. 9 e Figura 3. 10).

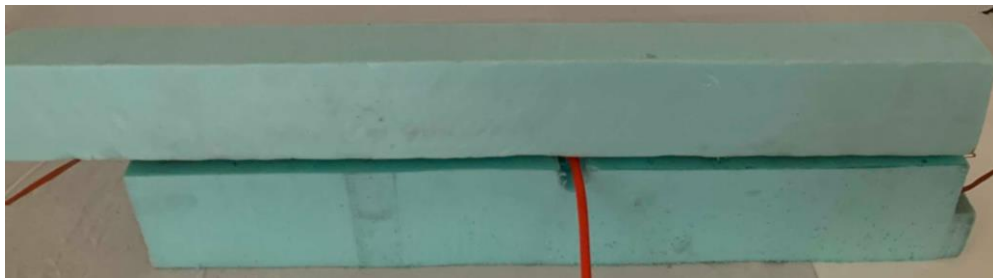


Figura 3. 9: Colocação de tampa de poliuretano sobre o tubo, vista frontal.



Figura 3. 10 Colocação de uma tampa de poliuretano sobre o tubo, vista de lateral.

Os ensaios experimentais foram realizados para os mesmos fluidos abordados na análise teórica sendo que para cada uma destas situações, determinou-se o coeficiente de transferência de calor para três caudais distintos (30 ml/min, 35 ml/min e 40 ml/min).

Adicionalmente, variou-se a temperatura da resistência térmica, uma vez que a condutividade térmica varia de acordo com a temperatura. Assim, e tendo em conta que as propriedades dos materiais variam de acordo com a temperatura, os ensaios acima descritos, foram feitos para temperaturas da resistência térmica de 50°C, 55°C e 60°C, perfazendo-se um total de 9 ensaios para cada fluido. No entanto, deve-se salientar que a temperatura para a qual a resistência térmica foi programada (T_r) é diferente da temperatura das paredes interiores do tubo (T_s) de alumínio. Deste modo, foi necessária a colocação de termopares ao longo da tubagem, para que a temperatura das suas paredes fosse determinada. Estes resultados encontram-se na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Correspondência entre a temperatura programada na resistência térmica e a temperatura das paredes do tubo.

| Temperatura da Resistência Térmica (T_r) (°C) | Temperatura das paredes interiores do tubo (T_s) (°C) |
|--|--|
| 50 | 48,65 |
| 55 | 52,87 |
| 60 | 58,75 |

3.2.4 Parâmetros a determinar

Área Superficial, A_s

O modo mais simples de promover uma maior taxa de remoção de calor é pelo aumento da superfície da área de contacto, ou seja, da área superficial. Esta técnica é frequentemente utilizada em permutadores e dissipadores de calor e pode facilmente ser conseguida pelo recurso a alhetas, que nada mais são do que uma própria extensão da superfície quente. Não obstante, pelo facto do *downsizing* marcar cada vez mais a atualidade, surgem incapacidades da utilização desta técnica.

Diferença de Temperatura, ΔT

Relativamente a este termo, é difícil manobrá-lo por forma a potenciar uma maior taxa de remoção de calor, uma vez que existem processos, como no caso dos motores de combustão, que apresentam maiores rendimentos para determinadas gamas de temperatura. Adicionalmente, os próprios materiais também apresentam limitações quanto à temperatura a que conseguem resistir, sendo que a sua estabilidade mecânica, física ou química pode-se

ver comprometida para determinados valores de temperatura, é o caso da impressão de rótulos, em que temperaturas excessivamente elevadas danificam o papel autocolante.

Coefficiente de transferência de calor por convecção, h

Este coeficiente, por se fazer depender de vários fatores, será relativamente fácil manipulá-lo, principalmente pelo ajuste do fluido de transporte. Tal como com a introdução de turbulência. A partir da Tabela 1.1, é possível observar que pela utilização de convecção forçada, atingem-se coeficientes de transferência de calor mais elevados. As propriedades do material de transporte, como a condutividade térmica, a viscosidade, a massa específica, entre outros, também representam fatores relevantes na determinação deste coeficiente.

3.2.5 Tratamento analítico

Obtidos os valores das temperaturas à entrada e à saída do fluido, e o valor da temperatura das paredes do tubo de alumínio, torna-se possível efetuar os cálculos necessários à determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção.

De acordo com a Lei de Newton para o arrefecimento, a taxa de transferência de calor para ou a partir de um fluido em escoamento dentro de um tubo, pode ser expressa de acordo com a Equação (22), (Cengel Yunus 2003)

$$\dot{Q} = hA_s\Delta T_{m\u00e9dio} \quad (22)$$

sendo que h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s a área de transferência de calor, que neste estudo representa toda a área interna do tubo e $\Delta T_{m\u00e9dio}$ representa uma média aritmética da diferença de temperatura entre a superfície quente e a temperatura média do fluido. Sabendo que a última aumenta na direção do escoamento, é necessário ter especial atenção à diferença desta diferença de temperatura.

A Figura 3. 11 mostra o balanço energético existente numa porção de volume controlado, representativo de uma porção do tubo utilizado nos ensaios experimentais.

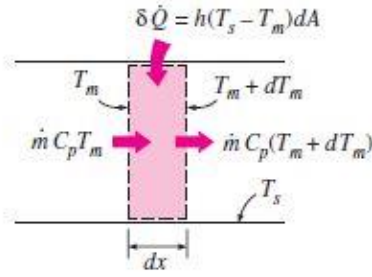


Figura 3. 11: Esquema das interações de energia existentes num volume de controlo diferencial de um tubo (Cengel Yunus 2003).

De acordo com a Figura 3. 11, é possível constatar que o aumento na energia do fluido (representado pelo aumento da sua temperatura média por dT_m) é igual ao calor transferido a partir da superfície do tubo para o fluido através da convecção. Surge assim a Equação (23):

$$\dot{m}c_p dT_m = h(T_s - T_m)dA_s \quad (23)$$

Sendo \dot{m} o caudal mássico e T_s e T_m são representativos da temperatura da superfície do tubo e da temperatura média do fluido, respetivamente, e dA_s da área superficial diferencial. Sabendo que $dA_s = p dx$, onde p é o perímetro interior do tubo e que $dT_m = -d(T_s - T_m)$, uma vez que T_s é constante, é possível modificar a Equação (23), para a Equação (24):

$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\frac{hp}{\dot{m}c_p} dx \quad (24)$$

Integrando desde $x = 0$ (entrada do tubo onde $T_m = T_i$), até $x = L$ (saída do tubo onde $T_m = T_e$), tem-se que:

$$\ln \frac{T_s - T_{out}}{T_s - T_{in}} = -\frac{hA_s}{\dot{m}c_p} \quad (25)$$

Os termos T_{out} e T_{in} correspondem à temperatura à saída e à entrada do fluido, respetivamente. Tendo a Equação (25) como base, é possível então determinar experimentalmente o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , através da Equação (26).

$$h = -\frac{\ln \frac{T_s - T_{out}}{T_s - T_{in}} \dot{m}c_p}{A_s} \quad (26)$$

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA – COMSOL

O recurso a simulações numéricas vê-se justificado pela facilidade de obtenção de resultados na avaliação dos fenómenos que se pretendem estudar, sejam eles o escoamento de um fluido ou a transferência de calor e também por muitas vezes ser economicamente inviável a realização de ensaios experimentais. A simulação numérica baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) o qual se caracteriza pela divisão de um determinado domínio em pequenas porções que juntas formam uma malha (Puga 2015). É então possível a aplicação de uma metodologia de cálculo matricial que permite a obtenção de soluções aproximadas. Para aplicação desta metodologia utilizou-se o software de simulação numérica COMSOL *Multiphysics*. O MEF pode ser dividido em três etapas distintas:

- Pré-processamento, onde se escolhe a malha, o material e o modelo matemático mais adequado ao estudo e se determinam as condições de fronteira. Esta etapa é a de maior importância, uma vez que é aqui que se definem todas as condições iniciais fundamentais para aproximar a simulação o máximo possível da realidade.

- Processamento, responsável pela elaboração das equações matriciais e vetoriais, pela imposição das condições de fronteira e pela obtenção da solução numérica;

- Pós-processamento, onde é possível visualizar os resultados obtidos com a simulação numérica.

O que se pretende retirar das simulações numéricas realizadas, são os valores da temperatura do fluido à saída do tubo, bem como perfis de velocidade de escoamento e de temperatura em todo o domínio, incluindo a parte sólida. Neste estudo, o escoamento encontra-se em regime laminar e estacionário e o que se pretende averiguar é a transferência de calor promovida pelo escoamento do fluido, pelo que existem dois módulos diferentes nestas simulações numéricas. Existe o módulo referente ao escoamento de um fluido e o modelo referente à transferência de calor em sólidos e líquidos, sendo que em conjunto correspondem ao módulo do COMSOL designado por *Conjugate Heat Transfer*, ou seja, transferência de calor com escoamento de um fluido. Cada um destes módulos será aqui abordado de forma independente.

4.1 Escoamento do fluido em regime laminar

Os estudos numéricos foram realizados para escoamento laminar e monofásico. A velocidade de escoamento junto às paredes do tubo é nula e atinge o seu valor máximo no centro do tubo.

4.1.1 Modelo numérico

Para o escoamento de um fluido, o modelo numérico baseia-se no princípio da conservação de massa, o qual pressupõe que a massa é constante para um dado volume de controlo (Lobarinhas, 2015), sendo este balanço caracterizado pela equação da continuidade, Equação (27):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) \right] \quad (27)$$

O escoamento de um fluido é também composto pelo pressuposto da conservação de momento que, de acordo com a 2ª Lei de Newton, a variação do momento de um corpo é igual ao somatório das forças aplicadas nesse mesmo corpo. Tratando-se do escoamento de um fluido, o momento será caracterizado pelo produto entre a velocidade e a massa, e as forças existentes e aplicadas ao fluido serão consequência da existência de pressão, do comportamento viscoso do fluido e da aceleração gravítica. Para descrever a conservação do momento, recorre-se às equações de Navier-Stokes, Equações (28),(29) e (30).

$$\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (28)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (29)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (30)$$

Com estas quatro equações é então possível elaborar um sistema de equações com quatro incógnitas (u_x, u_y, u_z, p) que, pelo facto de não existir solução analítica para estas

equações, surge a necessidade de recorrer a métodos numéricos para resolver o problema (Teixeira 2012).

4.1.2 Geometria e Malha

A geometria utilizada corresponde ao interior do tubo, no entanto, de modo a facilitar a simulação numérica por meio da redução do número de elementos da malha, utilizou-se apenas metade da geometria, uma vez que esta apresenta simetria.

Relativamente à malha utilizada, é de salientar que esta representa um aspeto deveras importante no que toca à fiabilidade dos resultados, pelo que são necessários alguns cuidados a ter, nomeadamente no tipo de malha para diferentes regiões, como é o caso das regiões que estão em contacto com a fronteira, seja esta a do *inlet* (superfície de entrada do fluido na tubagem), a do *outlet* (superfície de saída do fluido na tubagem) ou a correspondente ao tubo. Neste estudo a malha utilizada está adaptada à dinâmica de fluidos, sendo que desta maneira, esta apresenta diversos tipos de elemento diferentes, ou seja, para além dos elementos tetraédrico que constituem grande parte da malha, existem camadas superficiais em todas as fronteiras, compostas por outros tipos de elementos, formando uma espécie de casca capaz de promover uma melhor caracterização e fiabilidade de resultados nessas regiões.

Quanto menor a dimensão dos elementos da malha, mais elementos estarão presentes para um mesmo volume. Deste modo, a qualidade da malha está diretamente relacionada com a dimensão dos elementos. No entanto, quanto mais refinada for a malha, e por isso mais elementos esta tiver, o tempo decorrido de simulação aumenta, assim como a memória de computação. Torna-se necessário recorrer a um estudo prévio de convergência da malha, de modo a apurar qual é o refinamento a partir do qual já não se verifiquem variações nos resultados. O processo de convergência de malha encontra-se descrito mais detalhadamente no Anexo I – Convergência de malha.

A qualidade da malha pode ainda ser avaliada de acordo com a qualidade média do elemento. Este é um parâmetro que pode ser extraído no *software* COMSOL, o qual estima a proximidade existente entre os elementos da malha e os elementos que seriam ideais. De acordo com (Gothäll 2017), a qualidade de cada elemento varia entre 0 e 1, correspondendo 0 a um elemento totalmente distorcido e 1 a um elemento ótimo. Não obstante, de um modo geral, uma malha com elementos com qualidade inferior a 0.1 é considerada de fraca

qualidade, pelo que acima deste valor já será aceitável. No modelo utilizado, a qualidade média do elemento foi de cerca de 0.6289, deste modo é garantida a fiabilidade da malha.

4.1.3 Materiais

Abordando apenas o fluído, existe apenas um domínio sendo que a geometria é composta apenas por um material que neste caso é a água. Este fluido apresenta-se ao modelo numérico através das suas propriedades mais relevantes como é o caso da viscosidade, da condutividade térmica, da massa volúmica e do calor específico. As propriedades utilizadas, foram as pré-definidas pelo software, sendo que estas propriedades variam de acordo com a temperatura.

4.1.4 Condições de fronteira

As fronteiras impostas ao modelo são: o *inlet*, o *outlet*, o contacto do fluido com as paredes e o plano de simetria.

O *inlet* é a superfície de entrada do fluido no domínio, sendo que a condição que o caracteriza é apenas o caudal mássico, kg/s. Para este, utilizou-se apenas os valores iguais aos utilizados no processo experimental, uma vez que o objetivo é comparar os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente. O caudal máximo utilizado foi o de 40 ml/min, ao qual corresponde o número de Reynolds máximo de 0.35, garantido sempre que o escoamento se encontra em regime laminar, respeitando o modelo numérico.

No *outlet*, por forma a definir a região de saída do fluido, utilizou-se a pressão como condição de fronteira. Nos ensaios experimentais o fluido à saída escoava para um copo, portanto a pressão à saída é igual à pressão atmosférica que é igual a 0 Pa de pressão relativa.

Relativamente ao contacto com as paredes, aqui definiu-se a condição de não deslizamento, deste modo garante-se que a velocidade de escoamento junto às paredes é nula e que o seu máximo será atingido na região mais afastada destas, isto pode se verificar na Figura 4. 2.

Um plano de simetria ao longo de toda a tubagem, para que a velocidade de escoamento junto a esta fronteira não seja sensível à condição de não deslizamento.

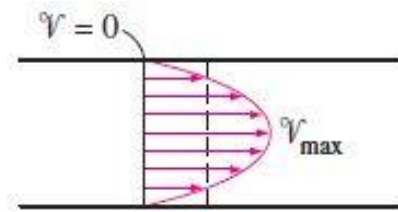


Figura 4. 1: Perfil de velocidades de escoamento dentro de um tubo (Cengel Yunus 2003)

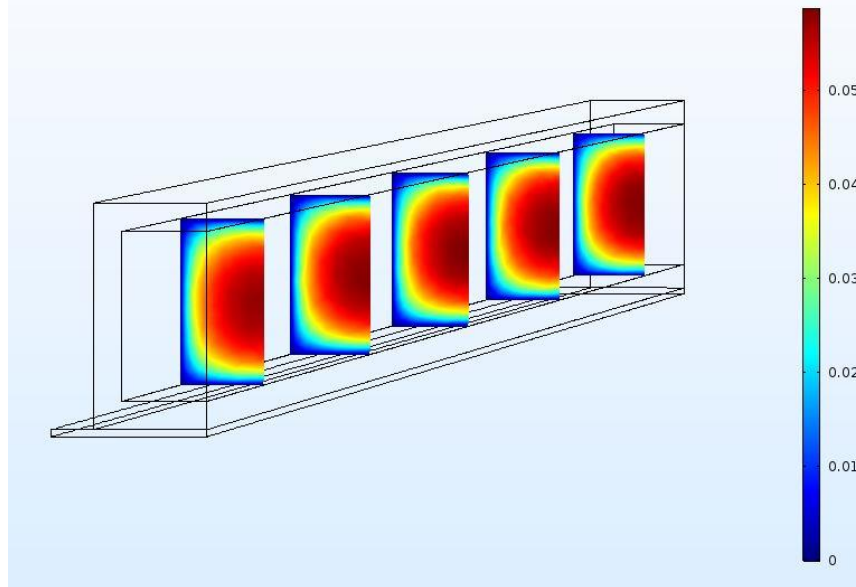


Figura 4. 2: Campo de velocidades no modelo numérico, sendo possível observar a condição de fronteira não deslizamento. Os valores da legenda encontram-se em m/s.

4.2 Transferência de calor

O declarado para o escoamento laminar mantém-se válido para o estudo da transferência de calor, uma vez que são módulos complementares neste estudo. No entanto, nesta secção apenas será abordado o referente exclusivamente à transferência de calor. Deste modo, surge então uma outra incógnita, a temperatura, a qual necessita ser caracterizada em dois meios distintos, o sólido referente ao tubo e à resistência térmica e o líquido referente ao fluido. Também neste módulo é fundamental definir uma condição de simetria, uma vez que só está representada metade da tubagem e da resistência térmica. É através deste tipo de simulação que é possível uma observação da variação da temperatura ao longo de todo o volume da tubagem, como se pode ver na Figura 4. 3.

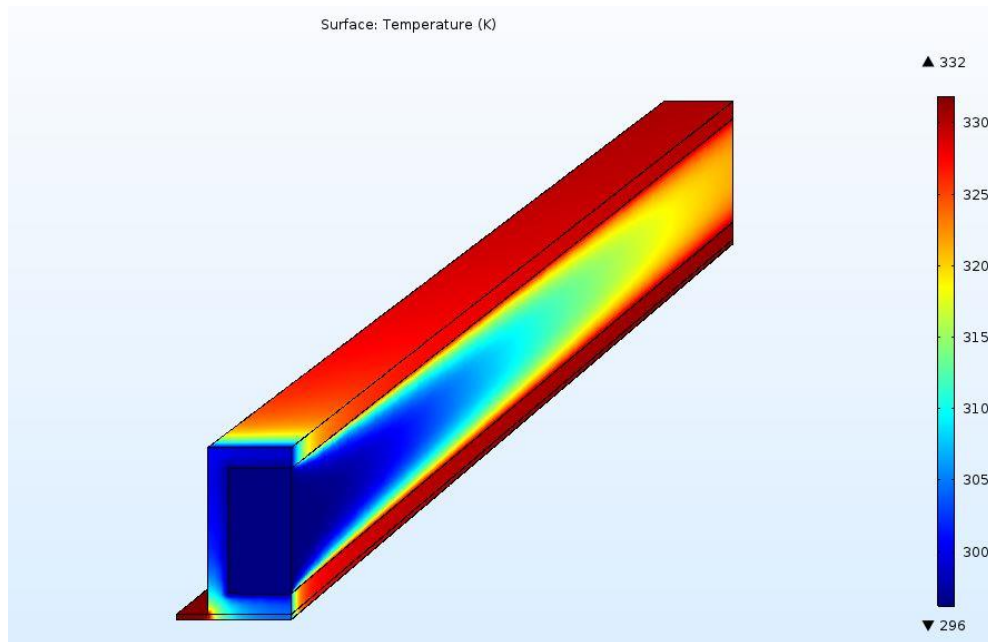


Figura 4. 3: Vista do perfil de temperaturas pelo escoamento de fluido ao longo da tubagem.

Com este tipo de visualização torna-se mais fácil compreender os fenómenos em causa de uma forma diferente da associada aos ensaios experimentais, permitindo deste modo uma análise mais detalhada em comunhão com a liberdade existente na aquisição dos valores de medição.

4.2.1 Modelo numérico

Devido ao movimento do fluido, para além do que já foi assente sobre a conservação de energia e de massa do fluido, existem ainda outras contribuições para a equação respetiva à transferência de calor. Em primeiro lugar, inclui-se a energia de transporte necessária para mover o fluido que, dependendo das propriedades térmicas do fluido e do regime de escoamento, pode ser predominantemente convectiva ou condutiva. Em segundo lugar, existe ainda produção de calor consequência da viscosidade do fluido. Adicionalmente, a variação da pressão e da densidade do fluido por meio da variação da temperatura podem apontar-se como meios de produção de calor (Huc 2014). Tendo em linha de conta todas estas contribuições, a Equação (31), representa estas mesmas:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \alpha_p \left(\frac{\partial p_A}{\partial t} + u \nabla p_A \right) + \tau : S + \nabla (k \nabla T) + Q \quad (31)$$

Por forma a descrever o perfil de temperatura nos corpos sólidos, tratando-se de um estado estacionário, é possível aplicar a Lei de Fourier, já abordada anteriormente, caracterizada pela Equação (32):

$$q = -k\nabla T \quad (32)$$

4.2.2 Geometria e malha

A geometria utilizada corresponde à metade do tubo quadrado assente em metade da resistência térmica, uma vez que estes dois corpos são simétricos longitudinalmente e, deste modo, reduz-se o tempo de simulação por meio de redução do número de elementos de malha existentes. É necessário considerar ainda a geometria corresponde ao escoamento do fluido. Deste modo, é possível criar domínios diferentes para que se possa aplicar diferentes módulos de simulação a cada um deles, sendo estes o módulo sólido correspondente à resistência térmica e à tubagem e o módulo líquido correspondente ao fluido. A presença de dois módulos pode ser verificada na Figura 4. 4.

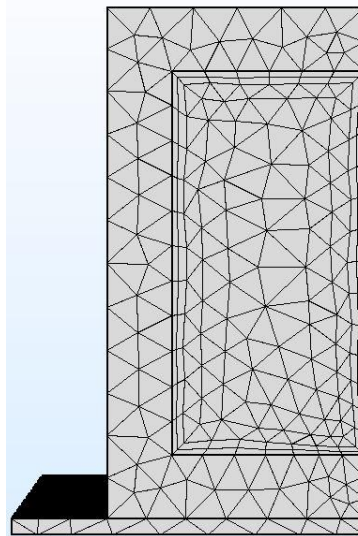


Figura 4. 4: Vista da malha correspondente à secção do tubo onde se encontra o inlet.

Similarmente ao estudo de convergência de malha para o escoamento, foi realizado o mesmo tipo de estudo relativamente à transferência de calor. Deste modo, ambos os domínios (sólido e líquido) têm que ser tidos em conta, devendo salientar que a qualidade média do elemento foi de cerca de 0.6481 garantindo a fiabilidade da malha. O processo de convergência de malha encontra-se descrito mais detalhadamente no Anexo I – Convergência de malha.

4.2.3 Materiais

Para a análise à transferência de calor, é necessário abordar os dois domínios existentes: o sólido, composto pela resistência térmica e pelo tubo de alumínio, e o líquido representativo da água em escoamento. As propriedades utilizadas, foram as pré-definidas pelo software, sendo que para o caso da água, estas propriedades variam de acordo com a temperatura. No entanto, no tratamento analítico de dados, as propriedades da água utilizadas diferem das utilizadas na simulação numérica e encontram-se já expostas na Tabela 3.2, sendo que as propriedades do alumínio e do nylon (material constituinte da resistência térmica) encontram-se resumidas na Tabela 4.1. É importante salientar que, por meio de simplificação e para efeito de tratamento analítico de dados, as propriedades da água foram consideradas constantes.

Valores das propriedades dos materiais utilizados para a simulação numérica relativa à transferência de calor, retirados do Software COMSOL, expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores das propriedades dos materiais utilizados na simulação numérica da transferência de calor.

| | Alumínio | Nylon |
|--|----------|-------|
| Calor Específico (J/kgK) | 904 | 1700 |
| Massa Específica (kg/m ³) | 2700 | 1150 |
| Condutividade Térmica (W/m ² K) | 237 | 0.26 |

4.2.4 Condições de fronteira

Todas as condições de fronteira aplicadas na análise ao escoamento são aqui também aplicadas. No entanto, existem outras, adicionais, relativas à transferência de calor, que são fundamentais para que uma melhor aproximação aos ensaios experimentais seja obtida.

Relativamente à resistência térmica utilizada como fonte de calor, esta foi representada por um paralelepípedo em contacto com a base inferior do tubo. A esta resistência atribuiu-se a temperatura de 50°C, sendo que as simulações se repetiram para as temperaturas de 55°C e de 60°C.

Uma vez que experimentalmente se colocou uma placa de poliuretano isolando o tubo, nesta simulação considerou-se que o fluxo de calor é nulo nas faces do tubo.

Adicionalmente é necessário garantir, uma vez que apenas está representada metade da tubagem, um plano de simetria ao longo de toda a tubagem e de toda a resistência térmica,

pelos motivos mencionados em 4.1.4 e também por questões adjacentes à transferência de calor.

5. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS NANOFLUIDOS

Existem atualmente diversos modelos teóricos segundo os quais é possível estimar a condutividade térmica dos nanofluidos. Nestes modelos, são assumidas propriedades quer do fluido base, quer das nanopartículas, como é o caso da condutividade térmica, da viscosidade, e do calor específico. Existem ainda outros parâmetros, como a concentração, a temperatura do fluido base, o movimento Browniano, o fator de forma, tamanho das partículas, entre outros, que são a principal fonte de erros associada ao cálculo da condutividade térmica dos nanofluidos, uma vez que a estes parâmetros estão associados mecanismos de ganho/perca de condutividade térmica, abordados na Secção 2.3. Dado o facto de que aos cálculos teóricos da condutividade térmica estão associadas fontes de incerteza, surge a necessidade da utilização de um método experimental capaz de determinar a condutividade térmica dos nanofluidos.

Na medição da condutividade térmica de fluidos, é fulcral ter em atenção que assim como os mecanismos de transferência de calor nos fluidos divergem dos sólidos, também as suas propriedades são diferentes, especialmente tratando-se de nanofluidos. Como tal, é necessário suprimir a formação de correntes de convecção dos líquidos, para que uma medição da condutividade térmica seja devidamente conseguida. Uma outra característica que dificulta a medição da condutividade térmica é o facto de os líquidos não apresentarem forma, tamanho nem áreas transversais bem definidas. Uma vez que tal medição exige que a homogeneidade do meio se mantenha, a presença das nanopartículas, no caso dos nanofluidos, pode surgir como um problema de relevante importância (Paul et al. 2010).

Não obstante, a condutividade térmica de fluidos pode ser medida com precisão, desde que se tenha em atenção alguns aspetos. É então fundamental conseguir medir a condutividade térmica num intervalo de tempo curto o suficiente para que as correntes de convecção não tenham tempo de se desenvolver, para além disso, no caso dos nanofluidos, este aspeto releva-se ainda mais importante uma vez que previne a deposição das nanopartículas, anulando uma fonte de erro. Complementarmente, o líquido deve ser aquecido pela sua superfície superior ao invés da inferior, pelos mesmos motivos. Tendo em conta estes pressupostos, entre outros, foram desenvolvidas várias técnicas capazes de levar

a cabo a medição da condutividade de fluidos, como é o caso do método *transient hot-wire*, que é o mais usualmente utilizado (Paul et al. 2010).

Neste estudo serão abordados os métodos *transient hot-wire*, *steady-state parallel-plate method (HOT-DISK Transient Plane Source)* e ainda um método adaptado para fluidos, cujos ensaios decorreram na Universidade do Minho.

5.1 *Transient Hot-Wire*

Este método utiliza uma sonda que é inserida no fluido sobre o qual se pretende determinar a condutividade térmica. Nesta sonda, encontra-se um fio metálico, que a maior parte das vezes é de platina, que funciona como fonte de calor, assim como termómetro. Uma corrente elétrica constante é fornecida a este fio metálico, de maneira a aumentar a sua temperatura por efeito resistivo e que, conseqüentemente, aumenta a temperatura do fluido onde está inserido, dependendo da condutividade térmica do mesmo (Paul et al. 2010). A condutividade térmica do fluido é então obtida a partir da mudança relativa na resistividade do fio, que por sua vez é medida recorrendo a um sistema de medição constituído por quatro fios resistivos (Sarviya e Fuskele 2017). Na Figura 5. 1, está representado um esquema da instalação experimental do método *Transient Hot-Wire*.

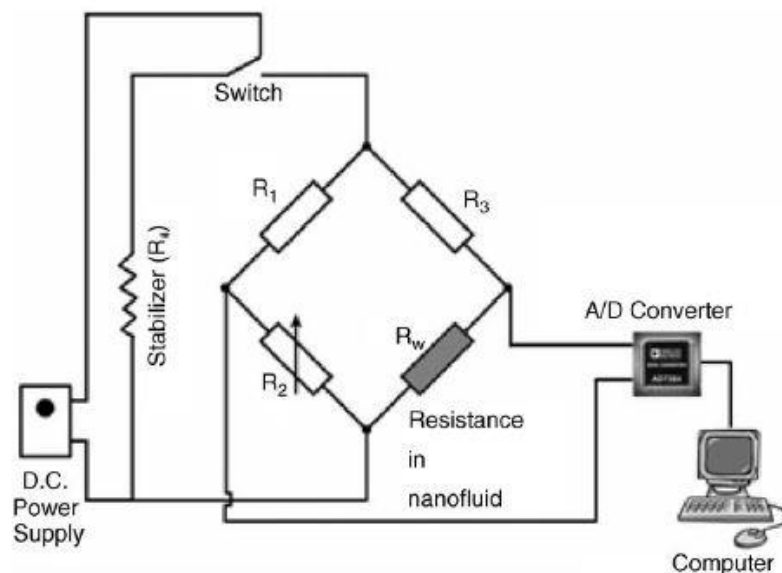


Figura 5. 1: Esquema da instalação experimental do método Transient Hot-Wire (Paul et al. 2010).

Este método baseia-se num princípio de medição da temperatura e do tempo de resposta do fio quando sujeito a um impulso elétrico. Estas medições devem ser o mais curtas

possíveis, de maneira a que o impulso elétrico não tenha tempo suficiente para gerar correntes de convecção no fluido (Paul et al. 2010).

As principais vantagens associadas à utilização deste método, residem na sua capacidade de eliminar os erros provocados devido à existência de convecção natural, é bastante mais rápido que outros métodos existentes e apresenta uma metodologia e instalação simples (Paul et al. 2010).

5.2 *Thermal constants analyzer technique*

Neste método, é utilizada a teoria da Fonte Plana Transiente (FPT) (*Hot-Disk Transient Plane Source*) para estimar a condutividade térmica dos fluidos. O seu elemento mais importante, FTP, assume-se como sensor de temperatura e como fonte de calor. Este método, tal como o anterior, usa a lei de Fourier para a condução de calor como seu princípio na medição da condutividade térmica. Aqui, o seu elemento FPT, é utilizado pelo analisador de constantes térmicas para medir o valor da condutividade térmica de um fluido, consiste numa folha fina eletricamente condutora, com um padrão pré-definido, inserida dentro de duas camadas isoladoras. Na Figura 5. 2 pode observar-se um exemplo desta folha. Os componentes presentes neste tipo de tecnologia são um Analisador de constantes térmicas, um banho de temperatura constante, sensores de temperatura e um recipiente (Paul et al. 2010).



Figura 5. 2: Sensor, fonte plana transiente («Kapton Sensors» -)

Para medir, efetivamente, a condutividade térmica, a FPT é imersa verticalmente no recipiente contendo o fluido em questão, o qual é colocado no banho a temperatura

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

constante. A variação da resistência é medida para que fique registado o aumento da temperatura causado pelo fornecimento de corrente elétrica à FPT. A temperatura do fluido é medida pelo sensor de temperatura e a sua condutividade térmica é determinada pela medição da resistência da FPT. Por forma a suprimir a convecção natural, o tempo de teste é normalmente muito pequeno, na ordem dos segundos. O banho termostático é utilizado para que se garanta a uniformidade e estabilidade da temperatura, (Sarviya e Fuskele 2017). Na Figura 5. 3 encontra-se esquematizada uma instalação referente à técnica da fonte plana transiente.

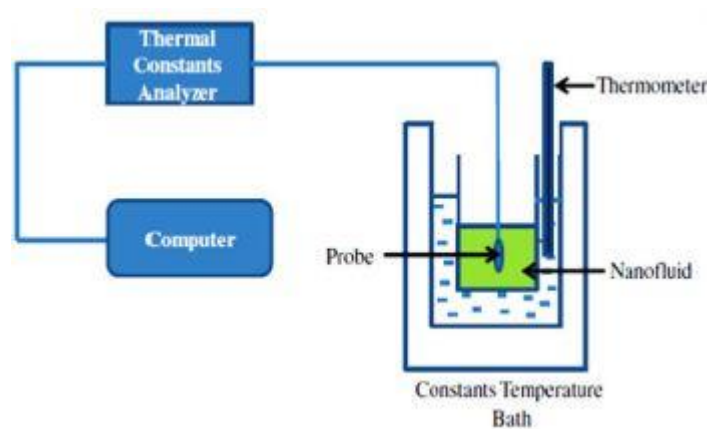


Figura 5. 3: Esquema da instalação necessária para medição da condutividade térmica através de um medidor de constantes térmicas com recurso a uma fonte plana transiente (Sarviya e Fuskele 2017).

As principais vantagens associadas a este método são a possibilidade de efetuar medições rápidas, poder medir uma elevada gama de condutividades térmicas, o tamanho das amostras pode ser flexível e as amostras não precisarem de preparação alguma.

5.2.1 Hot Disk TPS 2500 S

Existem vários instrumentos que se regem pelos pressupostos acima redigidos, sendo que o utilizado neste trabalho foi o *Hot Disk TPS 2500 S*, produzido pela *Hot Disk Instruments*. O equipamento utilizado encontra-se na Bragantia Eco-Park e serviu de base para determinação da condutividade térmica do nanofluido utilizado, bem como da água destilada. Este equipamento encontra-se ligado a um computador, de onde serão retirados os resultados obtidos, e pode ser observado na Figura 5. 4:

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos



Figura 5. 4: Hot Disk TPS 2500 S, presente em Bragantia Eco Park, utilizado para medição da condutividade térmica de fluidos.

As medições efetuadas divergiram ligeiramente do protocolo normalmente aconselhado, na medida em que o recipiente contendo o fluido sobre o qual se pretende saber a condutividade térmica, não se encontrava dentro de um banho termostático. Deste modo, as medições efetuadas foram mais suscetíveis a erros. A instalação utilizada encontra-se na Figura 5. 5:

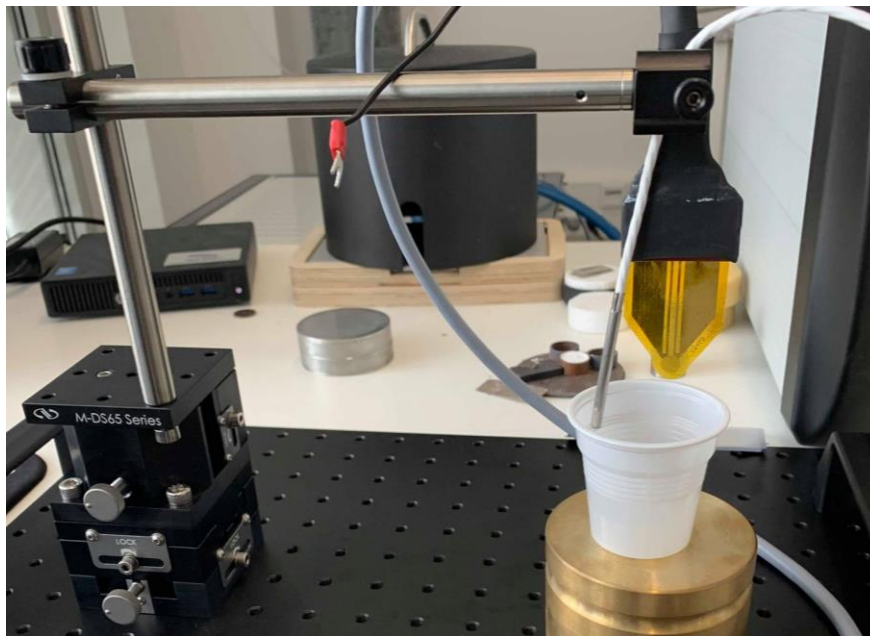


Figura 5. 5: Instalação utilizada para medição da condutividade térmica de fluido com o aparelho Hot Disk TPS 2500 S.

Como recipiente utilizou-se um simples copo de plástico e, para garantir que a FPT se encontrava centrada com o recipiente, utilizou-se um sistema de suporte. O conjunto da instalação e equipamento, encontram-se sobre uma mesa anti-vibrações, uma vez que a mais

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

pequena vibração pode comprometer o ensaio. Devendo-se ainda salientar que se deve fazer silêncio aquando da medição, pois até as vibrações sonoras interferem nos resultados, revelando-se estes ensaios bastante sensíveis. Durante os ensaios, a ponta arredondado sensor deve estar completamente submersa no fluido, sendo a medição efetuada durante 3 a 8 segundos. Após poucos minutos é possível obter vários resultados. Na Figura 5. 6 pode-se observar toda a instalação aquando da medição.



Figura 5. 6: Instalação utilizada para medição da condutividade térmica de fluido com o aparelho Hot Disk TPS 2500 S, aquando a medição.

5.2.2 Resultados obtidos

Adicionalmente à condutividade térmica, com as medições efetuadas, foi possível também extrapolar os valores do calor específico dos fluidos testados. No entanto, os valores relativos ao calor específico revelaram-se diferentes do esperado, pelo que foi decidido não analisar estes resultados. Desta maneira, na Figura 5. 7, encontram-se gráficos correspondentes aos valores da condutividade térmica de acordo com a temperatura, obtidos com os ensaios experimentais, relativamente à água destilada e ao nanofluido de Fe_3O_4 com água destilada, com a concentração de 0,2%, sendo que as medições foram obtidas para um nanofluido funcionalizado e para um nanofluido não-funcionalizado (*Nacked*).

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

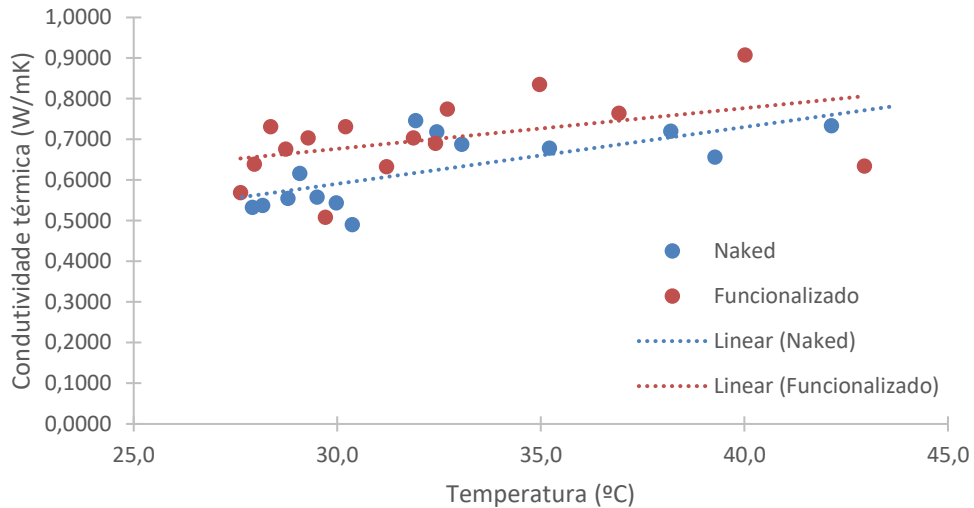


Figura 5. 7: Gráfico correspondente aos valores da condutividade térmica obtidos de acordo com a temperatura.

A partir da Figura 5. 7, é possível verificar, através da observação das regressões lineares, que os valores da condutividade térmica obtidos com o nanofluido funcionalizado são superiores aos obtidos com o nanofluido não-funcionalizado. Deste modo, estes resultados indicam que a funcionalização aumenta a condutividade térmica dos nanofluidos. Assim, foi decidido utilizar o nanofluido funcionalizado nos ensaios experimentais de convecção. Adicionalmente, foram feitas medições à temperatura ambiente, para três fluidos diferentes, sendo estes os dois nanofluidos já abordados, e água destilada. Os valores da condutividade térmica expostos na Figura 5. 8, são valores médios, assim como os valores da temperatura da água.

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

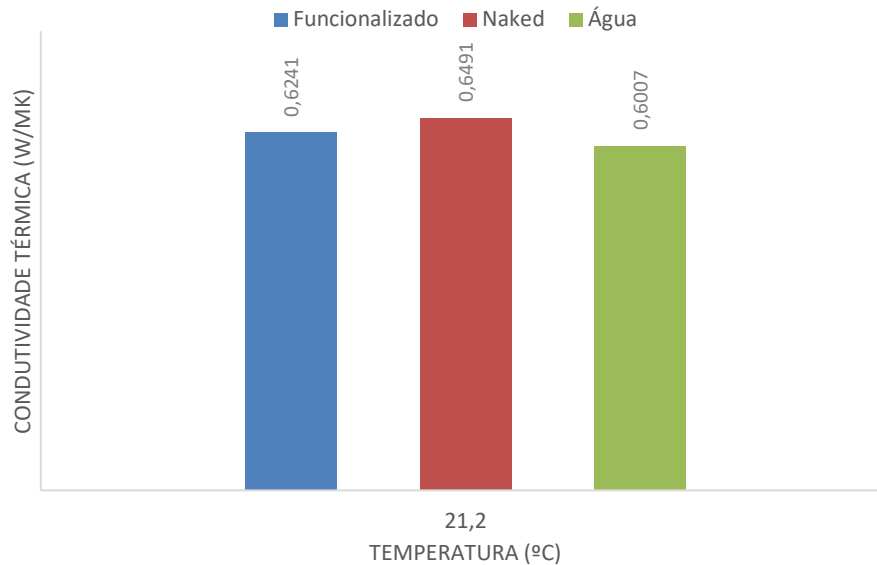


Figura 5. 8: Gráfico correspondente aos valores da condutividade térmica obtidos à temperatura ambiente, para fluidos diferentes.

Pela Figura 5. 8, é perceptível que o nanofluido não-funcionalizado apresenta valores de condutividade térmica ligeiramente superiores aos do funcionalizado, à temperatura ambiente. Estes resultados devem ser repetidos por forma a avaliar o efeito da temperatura na condutividade térmica.

5.3 Método de medição da condutividade térmica unidirecional

Devido à dificuldade em medir a condutividade térmica de fluidos, foram testados vários métodos experimentais.

Para tal, foi utilizado um equipamento, presente o laboratório de fluidos e energia do DEM, capaz de medir a condutividade térmica de provetes de material sólido. Como tal, o método de medição previsto para este equipamento teve de ser alterado, assim como o provete.

Na impossibilidade de se obter um provete de nanofluido, por razões evidentes, procedeu-se à elaboração de um provete capaz de albergar uma determinada quantidade de nanofluido, sendo que todas estas alterações deverão ser tidas em conta aquando dos cálculos necessários. A quantidade de nanofluido presente no interior do provete, terá que ser considerada como um sólido. Como tal, é assumido que o provete é sólido na sua totalidade, sendo apenas formado por dois materiais diferentes.

5.3.1 Lei de Fourier

Para que se possa determinar a condutividade térmica de um material, é necessário ter em atenção os conceitos associados à condução de calor em estado estacionário. Para tal, a Lei de Fourier indica:

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (33)$$

Onde k representa a condutividade térmica. Assim, através da Equação (33), tendo conhecimento do valor do fluxo de calor, e medindo a variação da temperatura, ΔT , entre dois pontos separados por Δx , é possível determinar o valor da condutividade térmica do material em questão. É fulcral ter em atenção que é exigido que o fluxo de calor seja unidirecional e constante ao longo do tempo.

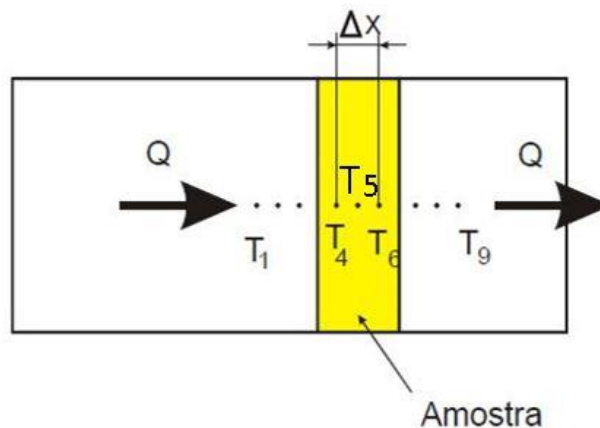


Figura 5. 9: Diagrama esquemático do equipamento utilizado na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos, indicando a localização dos termopares e a direção do fluxo de calor (Lobarinhas e Eduardo Ferreira 2006).

5.3.2 Equipamento

O equipamento utilizado consiste num conjunto de três resistências elétricas, as quais constituem a fonte de calor e que se encontram em torno de um cilindro de cobre. De forma a que as perdas térmicas para o exterior sejam minimizadas, este conjunto encontra-se, em toda a sua extensão, termicamente isolado por lã de rocha. É possível controlar a potência aplicada por efeito de Joule, uma vez que é permitido controlar qual ou quais as resistências térmicas a ligar, seja uma, duas ou as três. O cilindro utilizado para transferir o calor gerado nas resistências até ao provete é de cobre, uma vez que o cobre apresenta um coeficiente de transferência de calor elevado. Posto isto, falta ainda garantir que o fluxo ocorra de forma unidirecional. Para tal, a extremidade do cilindro, oposta à da que se encontram as

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

resistências térmicas, apresenta uma superfície alhetada que é colocada em contacto com um fluxo de água à temperatura ambiente, funcionando como uma fonte fria. Por intermédio de um cilindro hidráulico é possível o ajuste da estrutura em aço que protege todo este conjunto. Este cilindro, garante ainda a pressão de contacto necessária para que o ensaio ocorra devidamente, cerca de 100 bar, sendo esta pressão medida por um manómetro. O provete do qual se pretende medir a condutividade térmica é colocado entre a fonte de calor e o dissipador de calor, e encontra-se isolado perifericamente. Na Figura 5. 10 é possível observar um esquema da instalação.

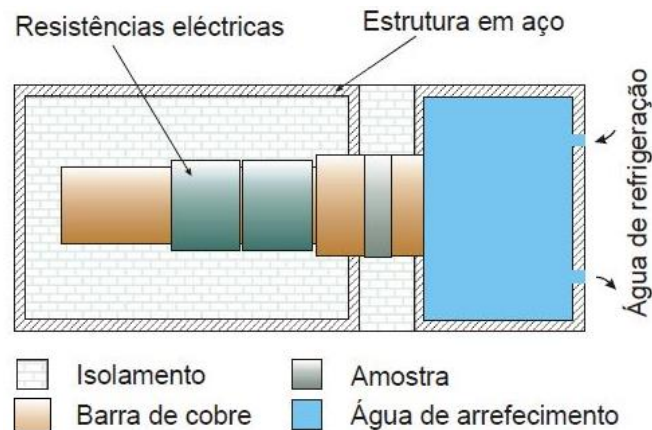


Figura 5. 10: Esquema do equipamento utilizado na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos, com indicação da sua constituição (Lobarinhas e Eduardo Ferreira 2006)

O equipamento possui 9 termopares, sendo que 3 são colocados na fonte quente, 3 no provete e 3 na fonte fria. Existem ainda outros dois termopares, que são colocados na superfície do equipamento, para que seja possível prever as perdas por calor na superfície do equipamento, quer por radiação, quer por convecção. Existe ainda outro termopar com a função de medir a temperatura ambiente, cujo valor é necessário para o cálculo das perdas térmicas. Estes termopares estão ligados a uma placa de aquisição de dados que, por sua vez, está ligada a um computador. Os dados adquiridos pela placa são possíveis de serem extrapolados para uma folha de excel e serão estes dados que servirão de base aos cálculos efetuados. Na Figura 5. 11, é possível observar o aspeto geral da instalação.



Figura 5. 11: Aspeto geral da instalação utilizada na determinação da condutividade térmica de materiais sólidos. Na imagem é possível observar a presença dos termopares e da placa de aquisição de dados.

5.3.3 Equações utilizadas

Como indicado anteriormente, para que seja possível determinar experimentalmente a condutividade térmica de um material, recorrendo à Lei de Fourier, Equação (33), é necessário determinar previamente o calor efetivo e saber qual é a diferença de temperatura associada a um determinado espaçamento. O calor efetivo será a diferença entre a potência elétrica das resistências que se encontram ligadas e as perdas para o exterior, Equação (34).

$$\dot{Q}_{efetivo} = P_{re} - (\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) \quad (34)$$

A Equação (35), pode ser utilizada para calcular as perdas por convecção, assim como a Equação (36), pode ser utilizada para estimar as perdas por radiação.

$$\dot{Q}_{conv} = h_{ext} \times A \times (T_{sup} - T_{amb}) \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \times \varepsilon \times A \times (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (36)$$

As temperaturas referidas nas equações acima são determinadas experimentalmente e as áreas são facilmente calculadas. ε representa a emissividade do material da instalação e σ é representativo da constante de Stefan Boltzmann. Relativamente ao coeficiente de transferência de calor por convecção, h , este terá que ser estimado, uma vez que não é uma propriedade estipulada, este valor varia de acordo com a natureza de movimento do fluido, das propriedades do mesmo, da geometria da superfície, entre outros. Para tal, é necessário recorrer a correlações empíricas estipuladas para números adimensionais, como é o caso do número de Prandtl (Pr), o número de Rayleigh (Ra), e o número de Nusselt (Nu).

Em primeiro lugar determina-se o número de Prandtl, razão entre a difusividade do momento e a difusividade térmica, com recurso à Equação (37)

$$\text{Pr} = \frac{Cp \times \mu}{k} \quad (37)$$

O número de Rayleigh pode ser obtido recorrendo à Equação (38), este resulta do produto entre o número de Prandtl e o número de Grashof, introduzindo o termo “ a ” (representativo da difusividade térmica do fluido) e descreve a razão entre a flutuabilidade e a viscosidade de um fluido.

$$\text{Ra} = \frac{g \times \beta \times (T_{sup} - T_{amb}) \times L^3}{\vartheta \times a} \quad (38)$$

Com os valores dos números de Prandtl e de Rayleigh determinados, é possível calcular o número de Nusselt pela Equação (39).

$$\text{Nu} = \left(0.60 + \frac{0.387 \times \text{Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad (39)$$

Com Equação (40), é então já possível determinar o valor do coeficiente de transferência de calor, necessário para determinação das perdas por convecção existentes.

$$\text{Nu} = \frac{h \times D}{k} \quad (40)$$

Após o cálculo das perdas existentes e do calor efetivo, com recurso à Equação (41), representativa da transferência de calor em sólidos, é possível então retirar o valor da condutividade térmica do material do provete.

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (41)$$

5.3.4 Provetes

Relativamente aos provetes utilizados, estes foram fabricados nas oficinas do DEM. O objetivo passou pela elaboração de dois provetes com dimensões iguais, à exceção do seu interior, sendo que um deles é oco com o objetivo de albergar o fluido e o outro é maciço e ambos são constituídos por uma liga de Alumínio. O provete oco é constituído por duas peças que encaixam uma na outra, uma peça fêmea, Figura 5. 12, e outra macho, Figura 5. 13, sendo o aperto realizado por meio de três parafusos, responsáveis, também, por garantir a estanquicidade do provete relativamente ao fluido a albergar no interior, dando origem ao provete representado na Figura 5. 14.



Figura 5. 12: Parte integrante do provete oco, peça fêmea.



Figura 5. 13: Parte integrante do provete oco, peça macho.

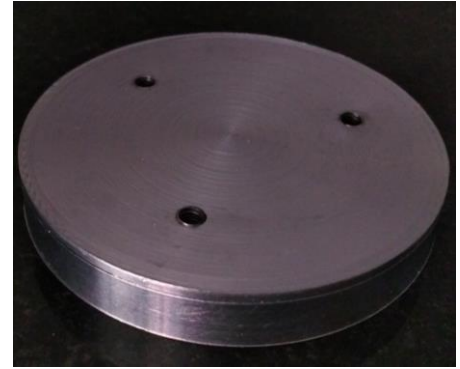


Figura 5. 14: Provete oco montado, ainda sem a colocação dos parafusos.

Relativamente ao provete maciço, este é apenas constituído por uma peça, sendo que para efeitos de similaridade, também se introduziu três parafusos nesta peça, Figura 5. 15. Em ambos os provetes. Três furos laterais com profundidades iguais e espaçados de 120° foram feitos, por forma a permitir a colocação dos termopares o mais próximo possível do centro do provete. Os desenhos técnicos relativos aos provetes elaborados encontram-se no Anexo III – Desenhos Técnicos.



Figura 5. 15: Provete maciço, com os parafusos colocados.

5.3.5 Ensaios experimentais

Inicialmente, foram realizados dois ensaios experimentais com o provete maciço. Em ambos os ensaios, o tempo decorrido desde o início do ensaio até ao seu final, foi de cerca de duas horas, exigidas para que os valores extrapolados da placa de aquisições fossem obtidos já em regime estacionário. Ambos os ensaios revelaram resultados inconclusivos, uma vez que se verificou discrepância acentuada entre os valores da condutividade térmica estimados para o mesmo provete. Na Tabela 5.1 encontram-se os valores de condutividade térmica obtidos com este tipo de estudo.

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

Tabela 5.1: Valores da condutividade térmica obtidos com o provete maciço.

| | Condutividade térmica k (w/mk) | |
|---------|----------------------------------|----------|
| | Ensaio 1 | Ensaio 2 |
| T4 – T5 | 33,05 | 21,67 |
| T4 – T6 | 54,83 | 1961,49 |
| T5 – T6 | 321,39 | 42,41 |

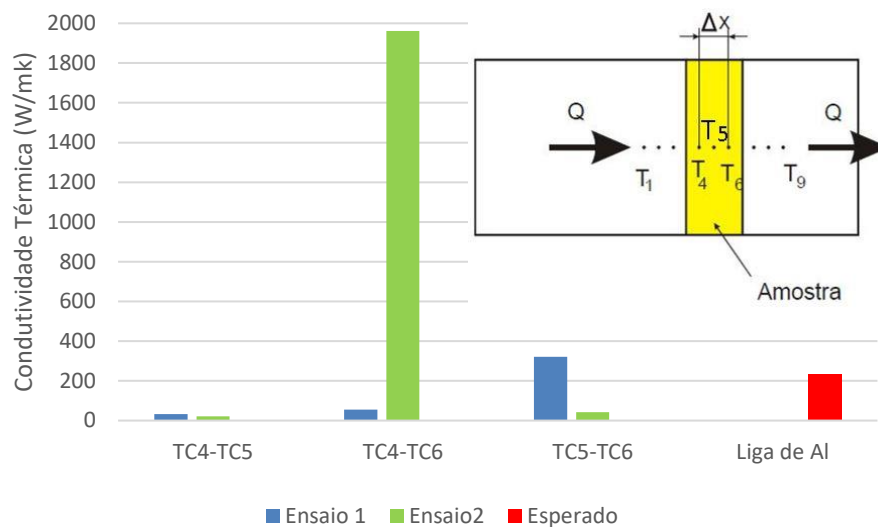


Figura 5. 16: Gráfico ilustrativo dos diferentes valores de condutividade térmica medidos no mesmo provete e com o mesmo provete em ensaios distintos.

Esta discrepância poderá dever-se: - à posição dos termopares relativamente ao centro do provete ser diferente; - ao facto de a ponta dos termopares se encontrar em zonas com condutividades térmicas diferentes, resultantes de microestruturas do material diferentes para diferentes zonas; - há presença ou falta de pasta térmica na ponta dos termopares, medindo estes, temperaturas diferentes.

O objetivo principal destes ensaios não foi concretizado, uma vez que passava por adaptar o equipamento descrito à medição da condutividade térmica de fluidos. Ensaios com o provete oco não foram então realizados por diversos motivos. Em primeiro lugar, os resultados obtidos com o provete sólido não foram coerentes. Em segundo lugar, na elaboração do provete oco, não foi possível garantir a sua estanquicidade. Considerações relativas a um ensaio utilizando o provete oco albergando fluido, capazes de rejeitar este processo de medição da condutividade térmica para fluidos podem ainda ser tecidas. O tempo de ensaio seria demasiado longo, promovendo a formação de correntes de convecção, assim

Determinação experimental da condutividade térmica dos nanofluidos

como o aquecimento do fluido não seria feito pela sua parte superior, suscitando a formação das mesmas. Deste modo, a existência de correntes de convecção, pode comprometer a medição da condutividade térmica. Trabalhos futuros são necessários por forma a avaliar a viabilidade deste método em medir a condutividade térmica de nanofluidos.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo destina-se à análise e discussão dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente, relativamente à transferência de calor.

Nos ensaios experimentais, a geometria utilizada foi sempre a mesma (tubagem da Figura 3. 6) e, por sua vez, para as simulações numéricas tentou-se aproximar ao máximo esta geometria e reproduzir as mesmas condições. Deste modo, a análise experimental permitiu avaliar a influência de diversos parâmetros como o tipo de fluido e a temperatura. Paralelamente, a análise numérica possibilitou o mesmo tipo de avaliação, sendo que os resultados obtidos retratam condições perfeitas, o que não é possível na realidade. Não obstante, os resultados numéricos permitem, de certo modo, comprovar em termos qualitativos os resultados obtidos experimentalmente. Saliente-se que após a obtenção dos valores, quer experimentais, quer numéricos, é necessário efetuar um tratamento analítico de dados, sendo que para ambos os casos, a metodologia utilizada encontra-se na Capítulo 3.2.5.

As temperaturas das paredes interiores do tubo (T_s), utilizadas para meio de cálculo analítico, ainda que numericamente sejam diferentes das medidas experimentalmente, como é possível verificar no Capítulo 6.3, as utilizadas serão as presentes na Tabela 3.4.

6.1 Influência da Temperatura Ambiente

Nos ensaios experimentais realizados existem dois parâmetros que caracterizam o meio externo, sendo estes a temperatura ambiente e a fonte de aquecimento. Como tal, os ensaios decorreram dentro de um compartimento composto por esferovite. Adicionalmente, as superfícies que não estão em contacto com a fonte de aquecimento, encontram-se protegidas por espuma de poliuretano (Figura 3. 10).

Relativamente à fonte de calor, como já foi dito, esta é programada num *set point*, sendo que o valor da temperatura oscila relativamente a este *set point*.

No referente à temperatura ambiente, utilizando água destilada foi possível verificar o efeito da temperatura ambiente por observação da temperatura do *inlet*. Na Figura 6. 1 e Figura 6. 2, é possível observar este efeito.

Análise e discussão dos resultados

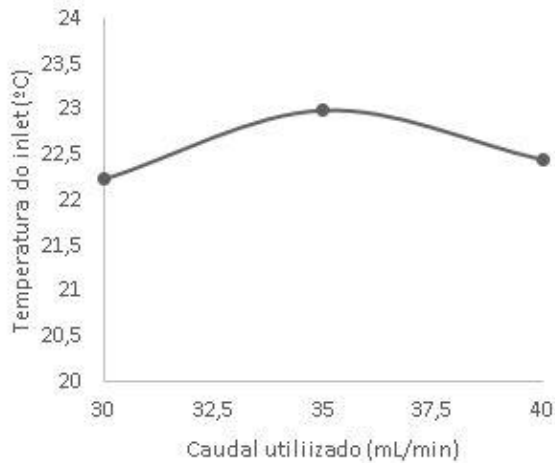


Figura 6. 1: Variação da temperatura de entrada da água destilada para o ensaio com a temperatura da fonte quente programada para 55°C ($T_r = 328,15 K$).

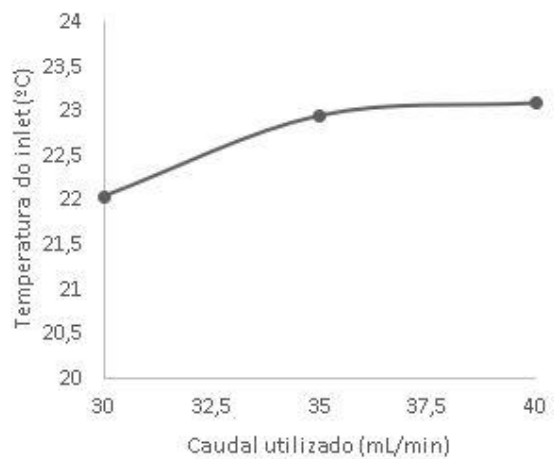


Figura 6. 2: Variação da temperatura de entrada da água destilada para o ensaio com a temperatura da fonte quente programada para 60°C ($T_r = 333,15 K$).

Deve-se ainda realçar que havendo influência da temperatura ambiente na temperatura do *inlet*, haverá influencia direta na transferência de calor.

6.2 Influência das propriedades do fluido e da temperatura

Nos ensaios experimentais foram utilizados dois fluidos, sendo estes: água destilada e um nanofluido de óxido de ferro (Fe_3O_4 em água destilada, com a concentração de um 0,2%). A utilização do nanofluido visa procurar evidências de aumentos na taxa de transferência de calor pela utilização de um fluido com maior condutividade térmica. Adicionalmente, os ensaios foram repetidos alterando a temperatura da resistência térmica, sendo que três temperaturas diferentes foram utilizadas, 50°C, 55°C e 60°C ($T_r = 323,15 K$, $T_r = 328,15 K$ e $T_r = 333,15 K$, respetivamente), com o objetivo de averiguar a influencia da temperatura na transferência de calor.

Após os ensaios experimentais, é necessário proceder a um tratamento analítico dos dados, matéria esta que se encontra descrita detalhadamente no Capítulo 3.2.5.

Na Figura 6. 3 observa-se a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção de acordo com o caudal utilizado, programando a temperatura da resistência térmica para 50°C ($T_r = 323,15 K$). Verifica-se que os valores obtidos com o nanofluido são superiores relativamente aos obtidos com a utilização de água.

Análise e discussão dos resultados

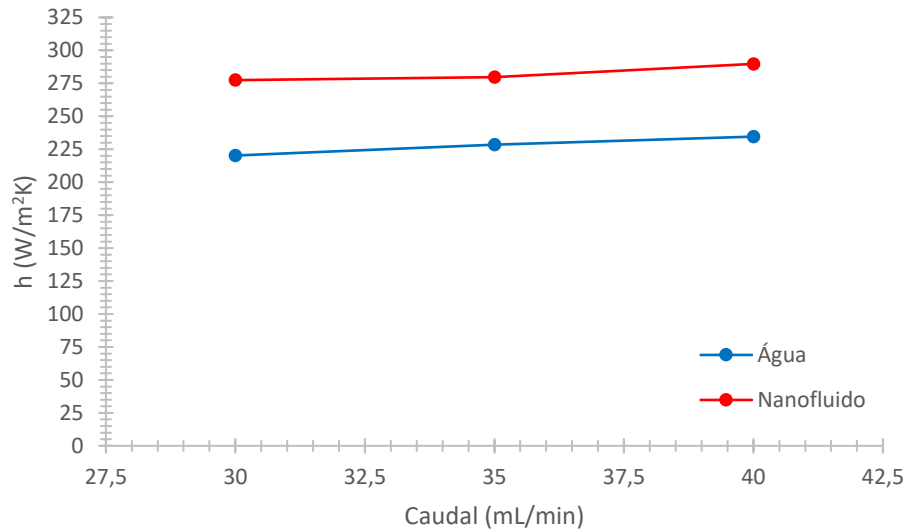


Figura 6. 3: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de $50^{\circ}C$ ($T_r = 323,15 K$).

Não obstante, aumentado a temperatura da resistência térmica e, assim, aumentando globalmente a temperatura do ensaio, verifica-se que a diferença entre o coeficiente de transferência de calor para o caso do nanofluido e da água destilada torna-se inferior. Na Figura 6. 4 é possível observar variação do coeficiente de transferência de calor por convecção de acordo com o caudal utilizado, programando a temperatura da resistência térmica para $55^{\circ}C$ ($T_r = 328,15 K$).

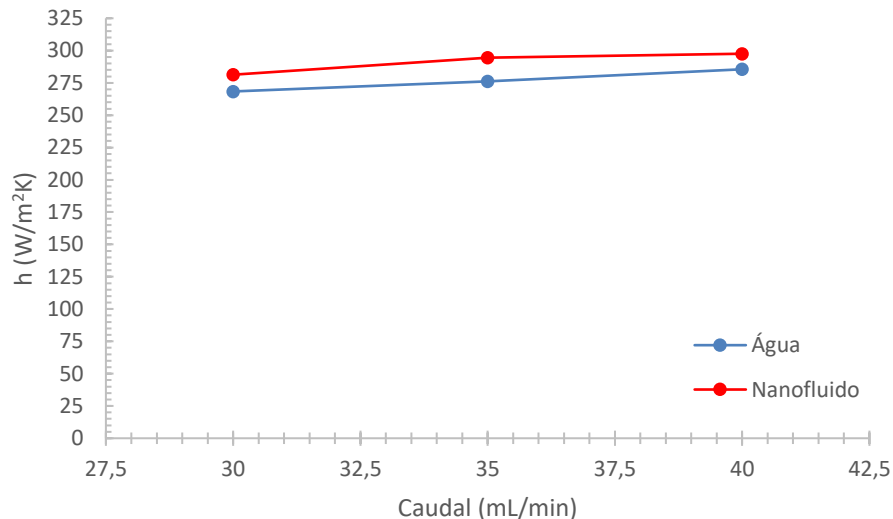


Figura 6. 4: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de $55^{\circ}C$ ($T_r = 328,15 K$).

Aumentando a temperatura da resistência térmica para $60^{\circ}C$ ($T_r = 333,15 K$), este efeito verifica-se novamente podendo ser observado na Figura 6. 5.

Análise e discussão dos resultados

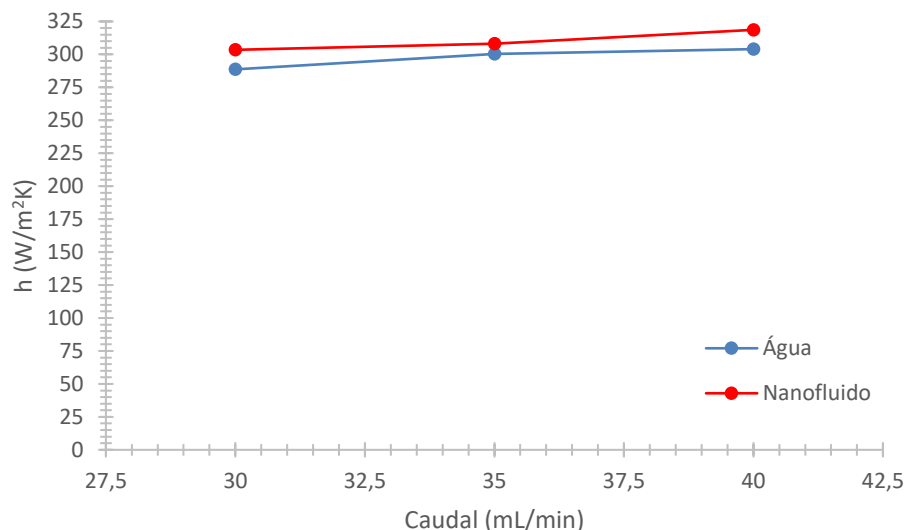


Figura 6. 5: Coeficiente de transferência de calor por convecção, da água destilada e do nanofluido, de acordo com o caudal, para a temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15 K$).

Com o aumento da temperatura global dos ensaios, verifica-se que, em ambos os fluidos, os coeficientes de transferência de calor por convecção aumentaram com a particularidade de, no caso da água destilada, aumentarem mais acentuadamente. Estes resultados poderão estar relacionados com a dependência da condutividade térmica e do calor específico com a temperatura.

Nos ensaios descritos, o principal mecanismo de transferência de calor presente é a convecção, como tal, será de esperar que a um maior coeficiente de transferência de calor por convecção corresponda uma maior taxa de calor removido, Equação (3). Na Figura 6. 6, observa-se a taxa de calor obtida, de acordo com o caudal utilizado, programando a temperatura da resistência térmica para 50°C ($T_r = 323,15 K$), verificando-se a premissa anterior.

Análise e discussão dos resultados

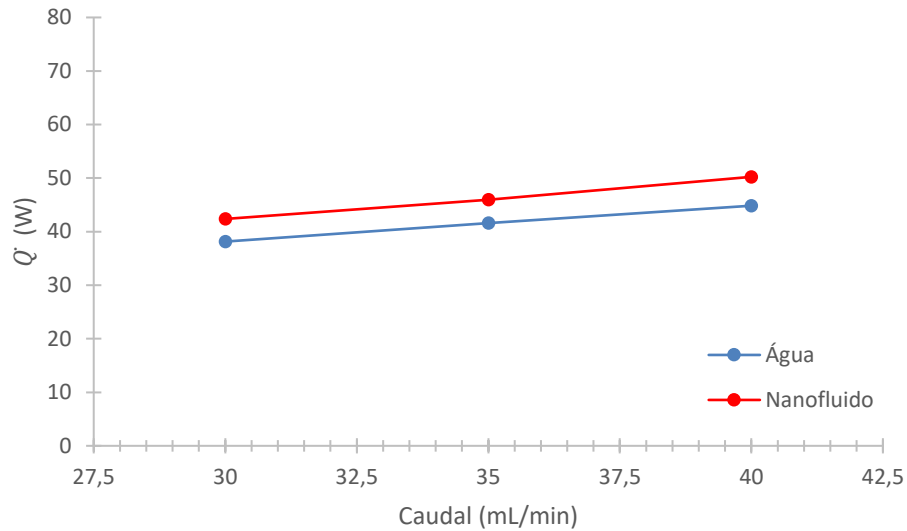


Figura 6. 6: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15\text{ K}$).

A Figura 6. 7 revela uma vez mais que a taxa de calor removido é proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção. Os resultados expostos, foram conseguidos programando a temperatura da resistência térmica para 55°C ($T_r = 328,15\text{ K}$).

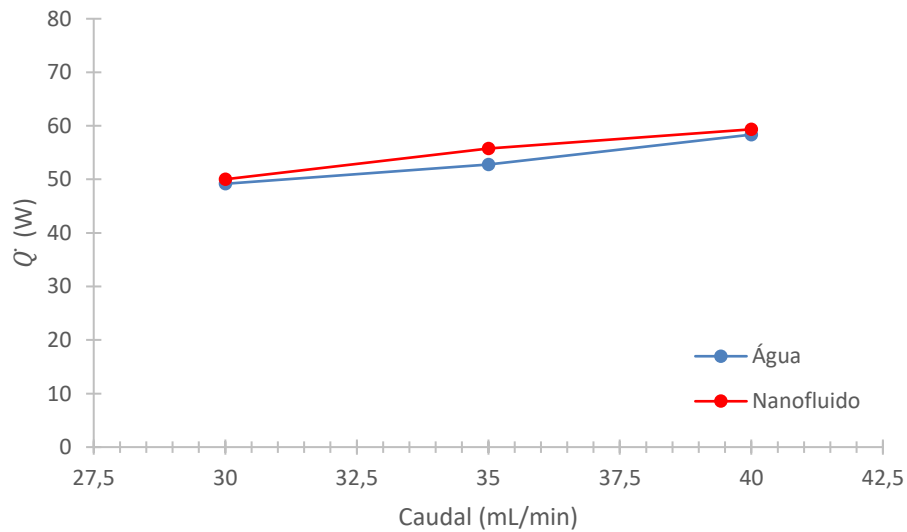


Figura 6. 7: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15\text{ K}$).

Aumentando a temperatura da resistência térmica para 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$), verifica-se novamente esta dependência. A Figura 6. 8, expõe os valores obtidos da taxa de calor de acordo com o caudal utilizado, para uma temperatura da resistência térmica programada para 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$).

Análise e discussão dos resultados

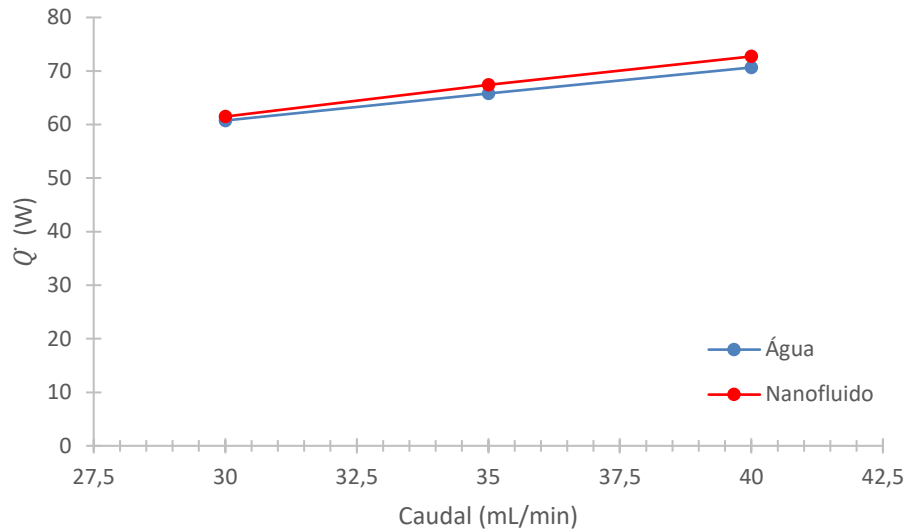


Figura 6. 8: Taxa de calor em função do caudal, para a água destilada e para o nanofluido, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$).

Globalmente, após esta análise, verifica-se que quer o coeficiente de transferência de calor, quer a taxa de calor transferido, são maiores quanto maior for o caudal utilizado. Adicionalmente, é possível constatar que quanto maior o coeficiente de transferência de calor por convecção, maiores foram as taxas de calor obtidas, fazendo todo o sentido, uma vez que o principal mecanismo de transferência de calor aqui presente, é a convecção.

Na Figura 6. 9 e Figura 6. 10 expõe-se, resumidamente, o efeito da temperatura global do ensaio no coeficiente de transferência de calor por convecção e na taxa de transferência de calor, respetivamente. Os resultados expostos, foram retirados utilizando sempre um caudal de 30mL/min.

Análise e discussão dos resultados

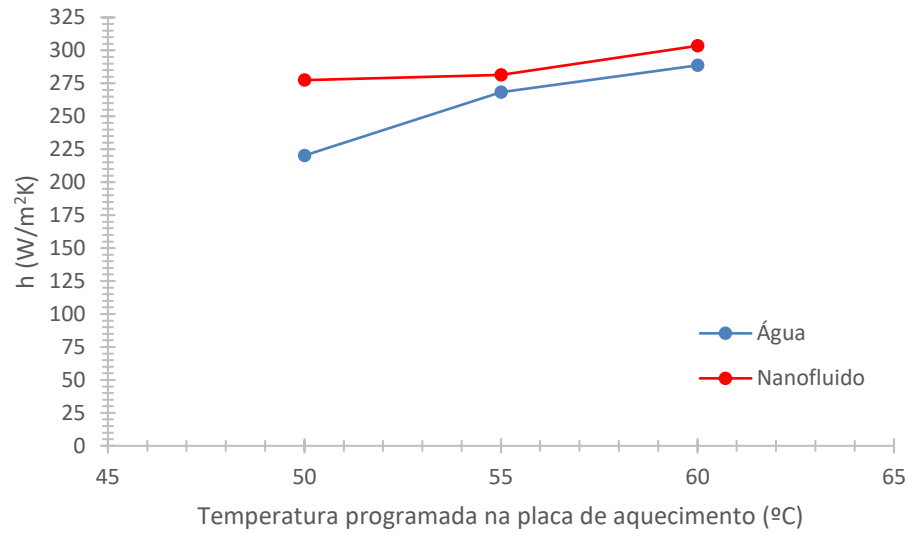


Figura 6. 9: Efeito da temperatura da resistência térmica no coeficiente de transferência de calor por convecção para um caudal de 30 mL/min.

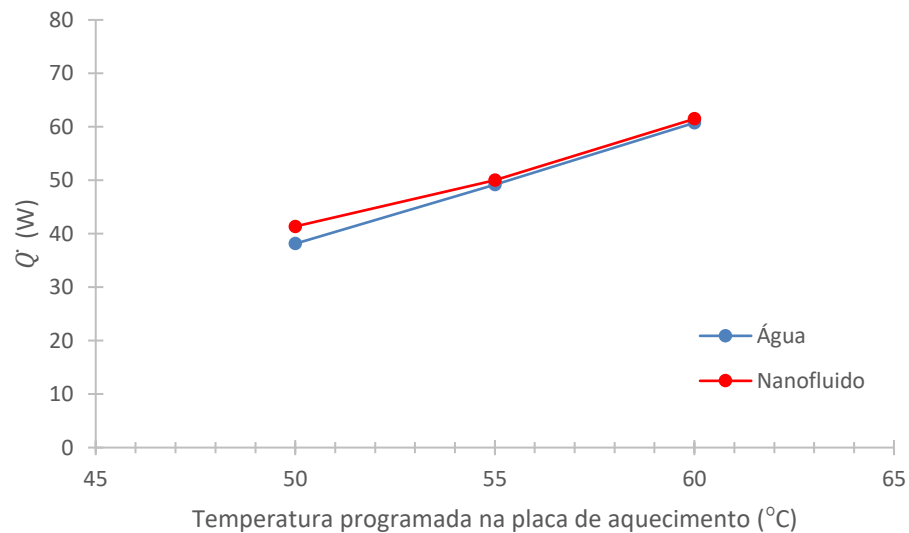


Figura 6. 10: Efeito da temperatura da resistência térmica na taxa de transferência de calor para um caudal de 30 mL/min.

Tendo em conta estes resultados, é possível concluir que para um mesmo caudal, quanto maior a temperatura global do ensaio, maiores foram o coeficiente de transferência de calor e a taxa de calor obtidos, sendo que para todo o caso, os valores obtidos com o nanofluido foram superiores aos obtidos com água destilada.

6.3 Resultados Numéricos

Relativamente às simulações numéricas efetuadas, estas serviram de apoio e suporte aos resultados obtidos experimentalmente. No entanto, existem resultados que não estão de acordo. Como tal, torna-se necessário efetuar conclusões por meio de comparação entre os resultados experimentais e os numéricos. Uma vez que as simulações numéricas foram efetuadas apenas para o caso da água, as comparações serão, evidentemente, feitas utilizando os valores obtidos experimentalmente com água destilada. Do mesmo modo que nos ensaios experimentais, as simulações numéricas foram repetidas alterando a temperatura correspondente à resistência térmica, sendo que as mesmas três temperaturas diferentes foram utilizadas, 50°C, 55°C e 60°C ($T_r = 323,15\text{ K}$, $T_r = 328,15\text{ K}$ e $T_r = 333,15\text{ K}$, respetivamente).

Após as simulações numéricas, é necessário proceder a um tratamento analítico de dados, matéria esta que se encontra descrita detalhadamente no Capítulo 3.2.5.

Nas seguintes figuras, encontram-se, compilados, os resultados obtidos experimental e numericamente, relativamente ao coeficiente de transferência de calor por convecção, utilizando as três temperaturas, mencionadas anteriormente, na resistência térmica. Pela Figura 6. 11, facilmente se observa um grande distanciamento entre os resultados obtidos, atribuindo à resistência térmica 50°C ($T_r = 323,15\text{ K}$).

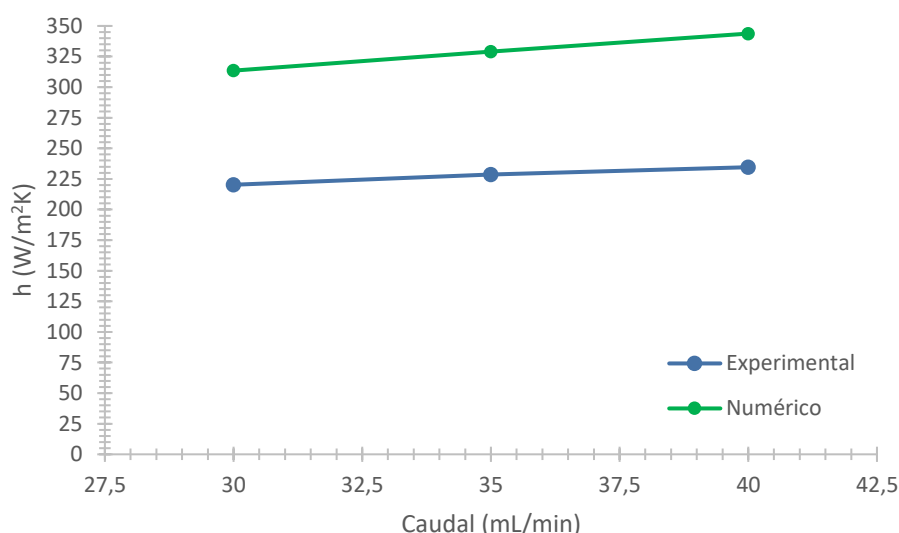


Figura 6. 11: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15\text{ K}$).

Não obstante, esta discrepância torna-se menor à medida que a temperatura da resistência térmica aumenta. Pode ser observado na Figura 6. 12, onde os resultados obtidos,

Análise e discussão dos resultados

atribuindo à resistência térmica 55°C ($T_r = 328,15\text{ K}$), ainda que algo distantes, têm tendência a aproximarem-se.

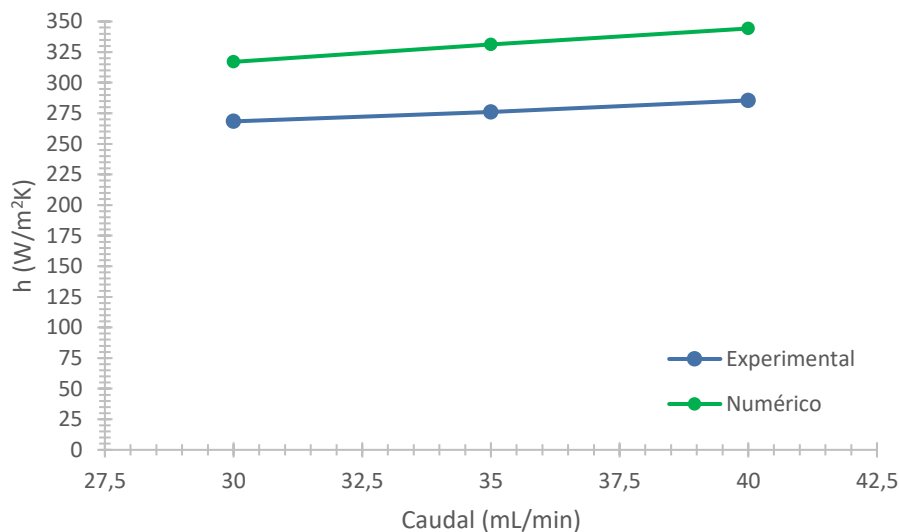


Figura 6. 12: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15\text{ K}$).

Na Figura 6. 13, encontram-se os resultados obtidos atribuindo à resistência térmica 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$), sendo que neste caso os valores voltam a se aproximar. Repare-se que os valores do coeficiente de transferência de calor obtidos numericamente apresentam variações muito pequenas, contrariamente aos valores obtidos experimentalmente. Isto dever-se-á quer a erros experimentais, quer a erros numéricos, nomeadamente a simplificações existentes.

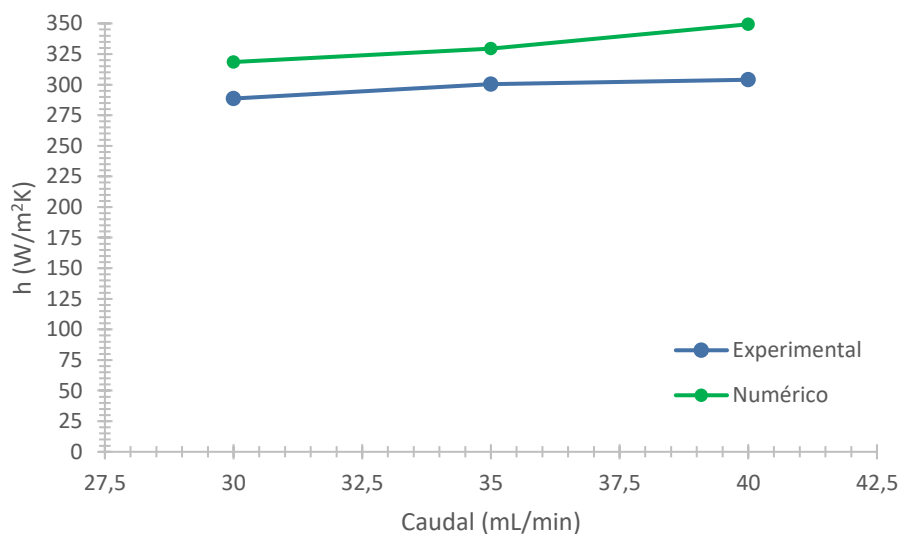


Figura 6. 13: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$).

Análise e discussão dos resultados

De um modo semelhante, também os valores obtidos, experimental e numericamente, relativamente à taxa de calor se encontram afastados atribuindo à resistência térmica 50°C ($T_r = 323,15 K$), Figura 6. 14.

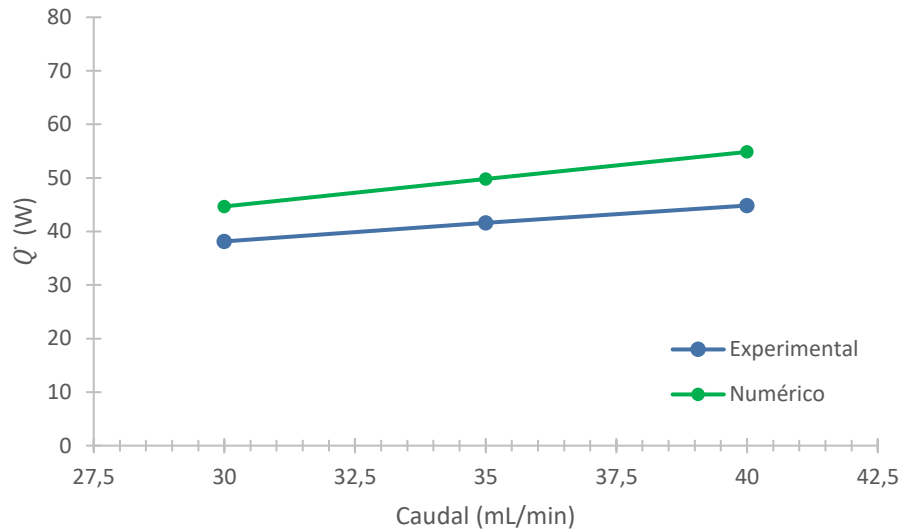


Figura 6. 14: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 50°C ($T_r = 323,15 K$).

Do mesmo modo, aumentando a temperatura da resistência térmica para 55°C ($T_r = 328,15 K$), estes valores aproximam-se, Figura 6. 15.

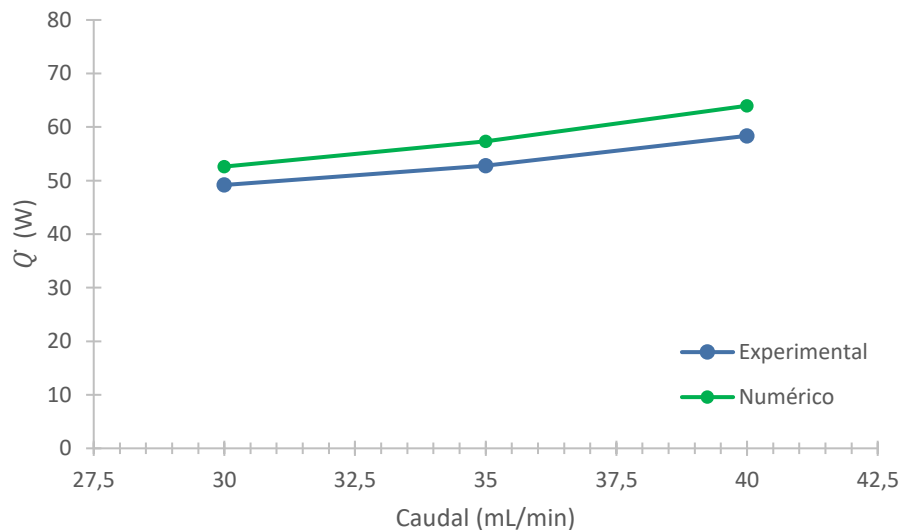


Figura 6. 15: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 55°C ($T_r = 328,15 K$).

Estes valores atingem o máximo de aproximação quando a temperatura da resistência térmica é estabelecida nos 60°C ($T_r = 333,15 K$), Figura 6. 16.

Análise e discussão dos resultados

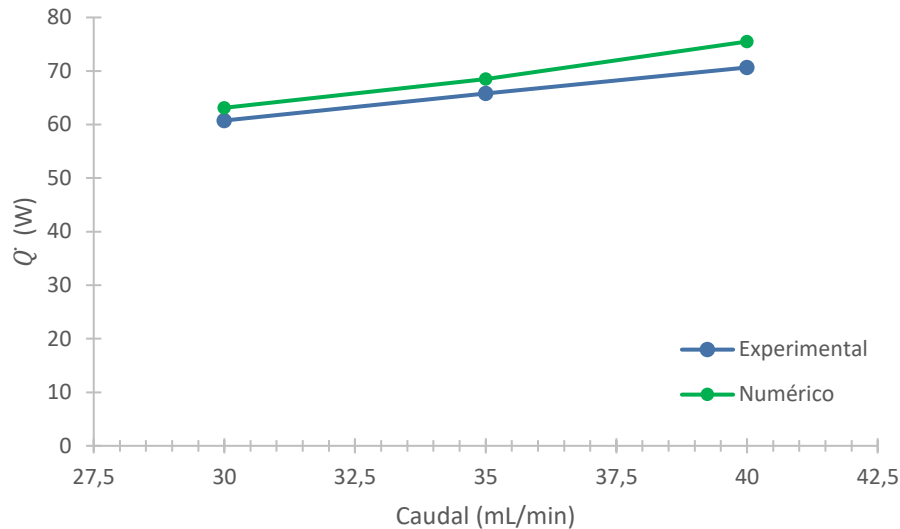


Figura 6. 16: Taxa de transferência de calor em função do caudal obtido experimental e numericamente, para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15 K$).

De um modo geral, aumentando a temperatura, a diferença entre os resultados experimentais e os resultados numéricos tende a diminuir, quer relativamente ao coeficiente de transferência de calor, quer relativamente à taxa de transferência de calor.

Em termos qualitativos, foi verificada uma certa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, na medida em que a maiores caudais e a maiores temperaturas, correspondem maiores coeficientes de transferência de calor e maiores taxas de remoção de calor.

Não obstante, numericamente verificou-se que o aumento da temperatura da resistência térmica e, por consequência, o aumento da temperatura global do ensaio, não apresenta um efeito tão acentuado no coeficiente de transferência de calor, ao contrário do que se verifica experimentalmente. De um modo contrário, este aumento de temperatura apresenta impacto considerável na taxa de transferência de calor, quer numérica, quer experimentalmente.

Todas as divergências existentes entre as simulações numéricas e os ensaios experimentais devem-se a simplificações do modelo numérico e/ou aos erros associados aos ensaios experimentais. No que concerne a simplificações do modelo numérico, realçam-se o facto da malha poder ser ainda mais refinada e das paredes da tubagem terem sido definidas como adiabáticas, o que experimentalmente tornou-se impossível de conseguir. Deve-se ainda focar que, no tratamento analítico de dados, considerou-se que as paredes da tubagem

Análise e discussão dos resultados

se encontravam todas à mesma temperatura e que esta é sempre a mesma ao longo de toda a tubagem, o que também implica um erro nos cálculos efetuados. Os valores assumidos para a temperatura interior das paredes encontram-se na Tabela 3.4, estes valores foram medidos experimentalmente com recurso a termopares. Deste modo, escolheu-se uma simulação para analisar a variação da temperatura ao longo da tubagem (desde $L=0$ até $L=L$) em cinco linhas diferentes, cuja localização é apresentada na Figura 6.17 Os valores foram obtidos para o caudal de 40mL/min e para uma temperatura da resistência térmica de 60°C ($T_r = 333,15\text{ K}$).

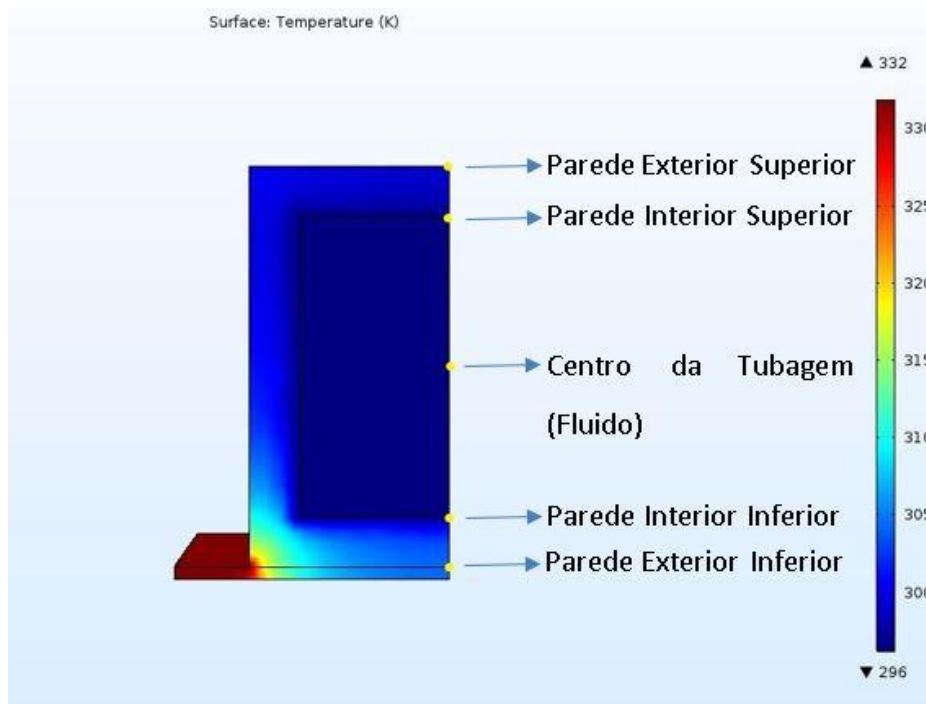


Figura 6. 17: Vista frontal da tubagem com legenda dos pontos ao longo da linha dos quais se retiraram as temperaturas até ao final da tubagem.

Quando mais refinada a malha, mais os valores obtidos se aproximam da realidade, pelo que foi feita uma outra convergência de malha, verificando-se que a que mais se adequa, uma vez mais, foi a malha *Finer*. Relativamente à parede exterior inferior (parede que está em contacto com a resistência térmica) os valores da temperatura ao longo da tubagem para diferentes tipos de malha, encontram-se compilados na seguinte Figura 6.18:

Análise e discussão dos resultados

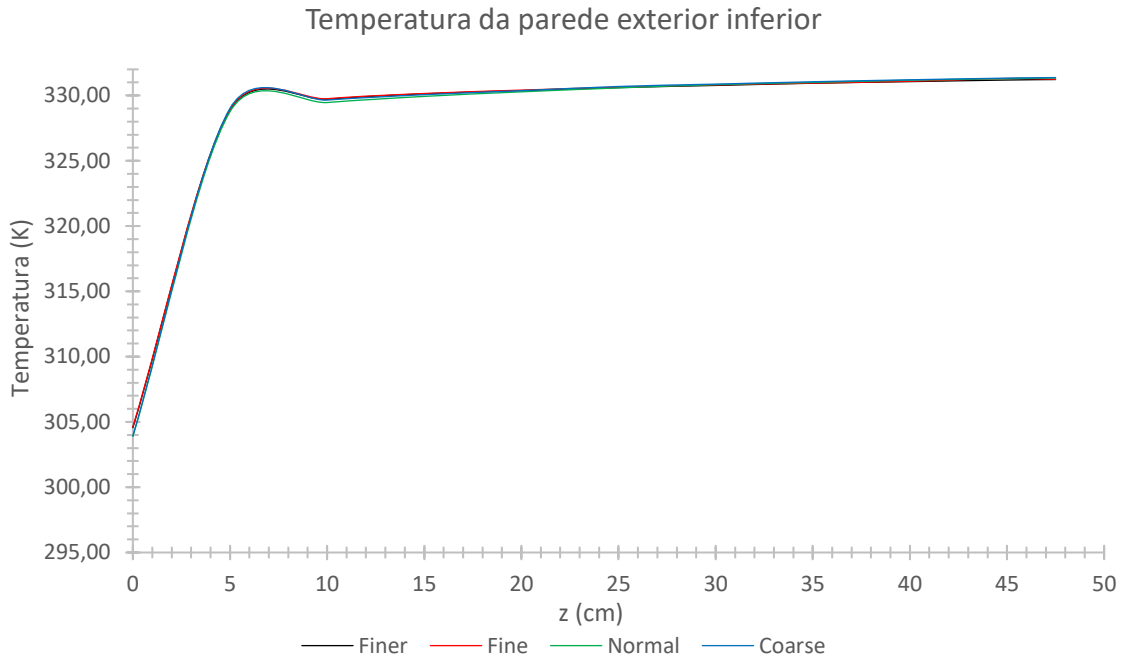


Figura 6. 18: Valores da temperatura da parede exterior inferior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha.

Relativamente a esta parede, conclui-se que o refinamento da malha pouco efeito tem na sua temperatura. Verificando-se o mesmo para a parede interior inferior, como se pode observar na Figura 6.19. Nesta parede, apenas a partir da marca dos 15 cm é que a sua temperatura se aproxima consideravelmente da temperatura utilizada no cálculo analítico, sendo esta equivalente a 333,15 K.

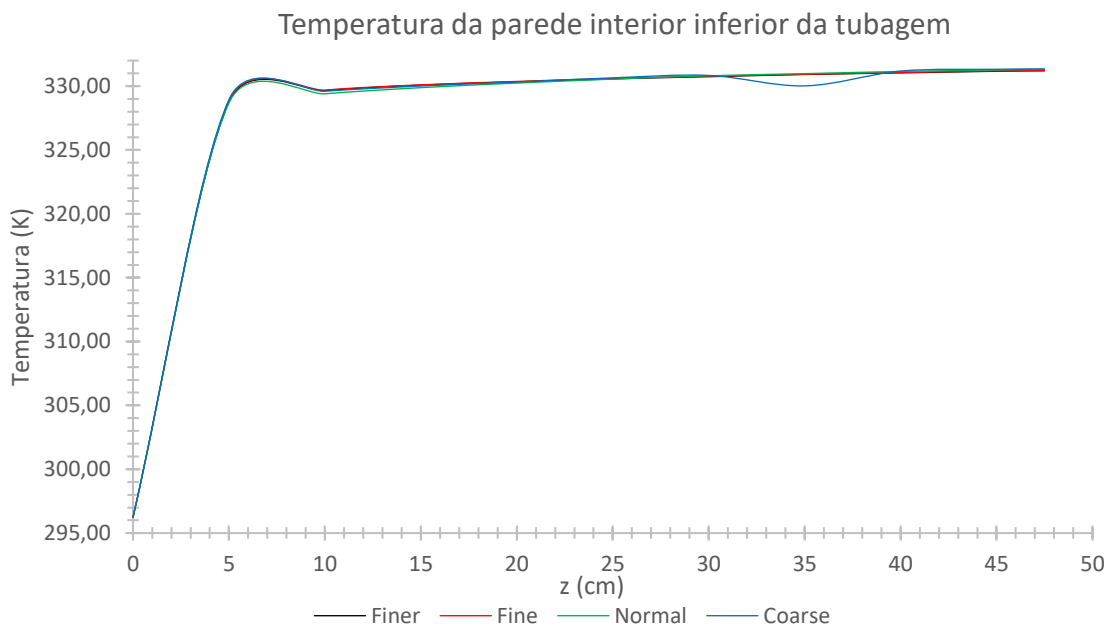


Figura 6. 19: Valores da temperatura da parede interior inferior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha.

Análise e discussão dos resultados

Relativamente à parede interior superior, também não se verificam grandes diferenças entre as temperaturas obtidas com diferentes tipos de malha, Figura 6.20. Ainda assim, salienta-se o facto de que nesta parede nunca é atingida uma temperatura próxima da utilizada no cálculo analítico, havendo sempre uma diferença de pelo menos 3K.

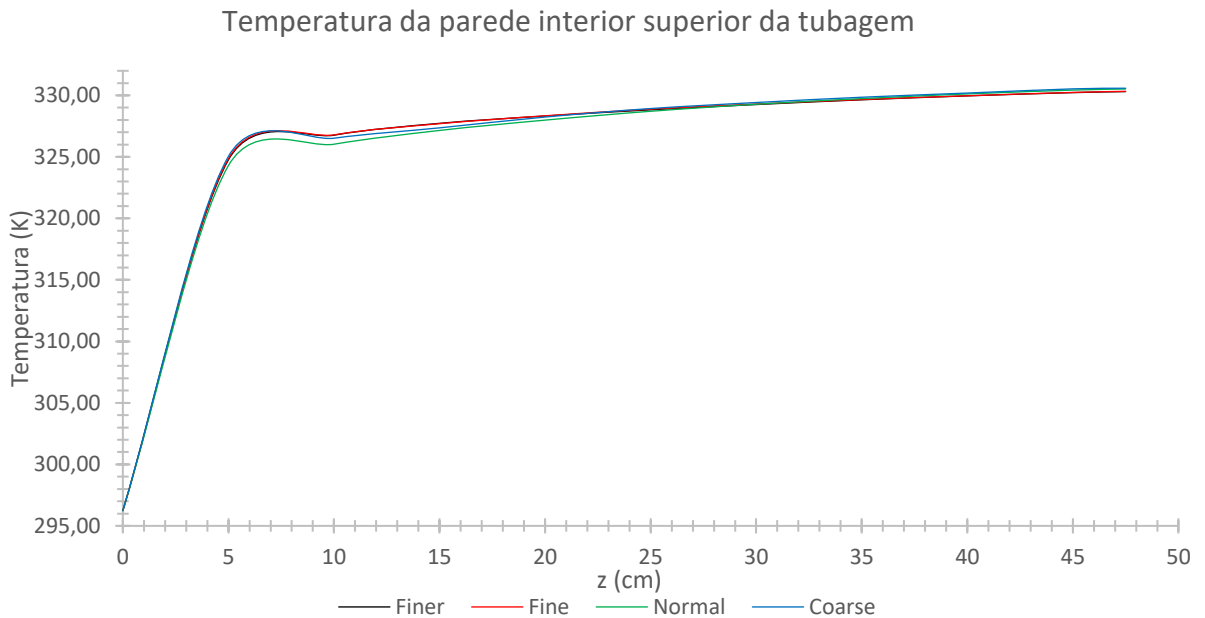


Figura 6. 20: Figura 6. 21: Valores da temperatura da parede interior superior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha.

Na parede superior exterior verifica-se precisamente o mesmo, como se pode observar na Figura 6.21.

Análise e discussão dos resultados

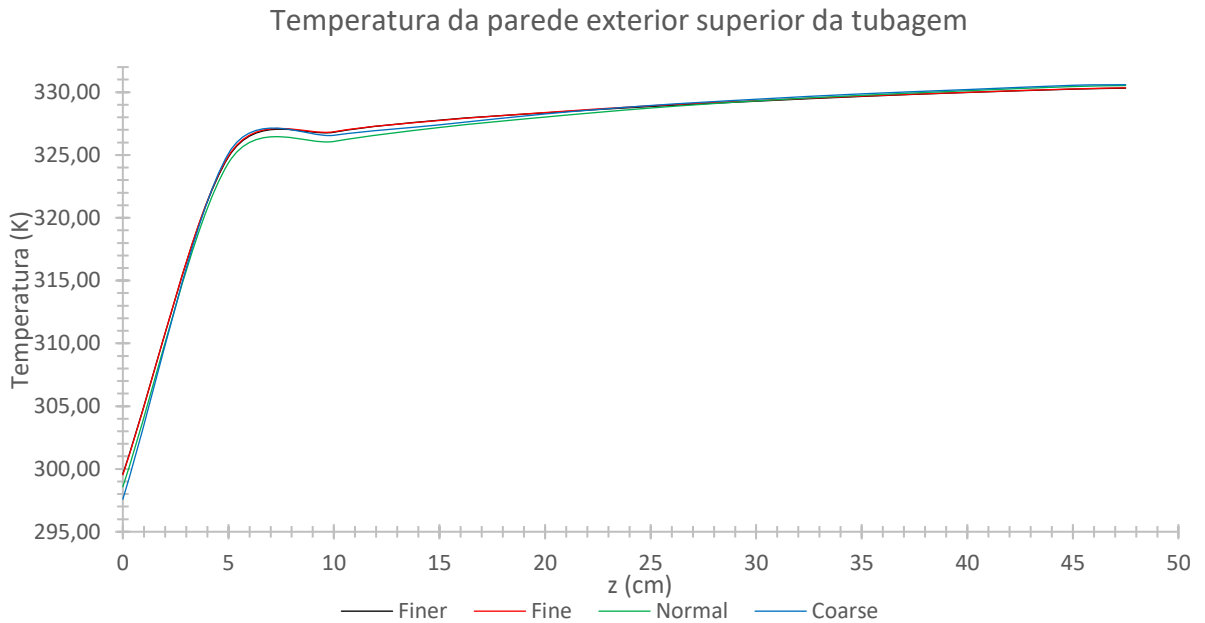


Figura 6. 22: Valores da temperatura da parede exterior superior ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha.

Contudo, ainda que nas paredes da tubagem não se verifiquem grandes mudanças de temperatura de acordo com o tipo de malha utilizado, no fluido estas mudanças são notórias. No centro da tubagem, correspondente ao centro fluido, verifica-se uma discrepância entre os valores obtidos para diferentes tipos de malha, podendo ser observados na Figura 6.22.

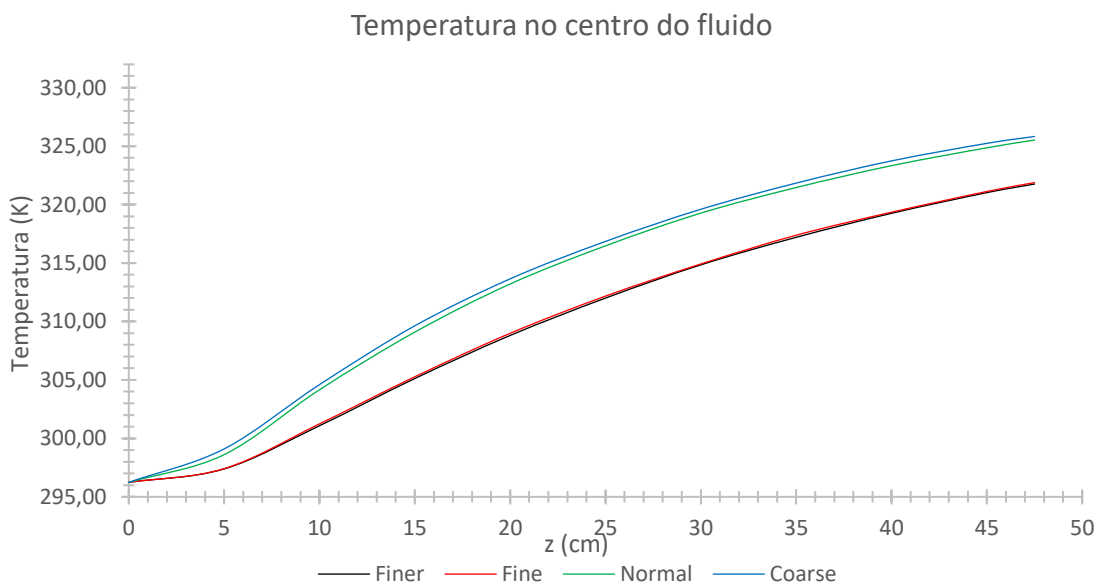


Figura 6. 23: Figura 6. 24: Valores da temperatura no centro do tubo (correspondente ao centro do fluido) ao longo da tubagem, de acordo com o tipo de malha.

Análise e discussão dos resultados

Aqui, verifica-se que não existem grandes diferenças entre as malhas *normal* e *coarse* e entre as malhas *finer* e *fine*. Não obstante, existe uma discrepância acentuada entre estes dois grupos, verificando-se melhores resultados para o segundo.

Nos ensaios experimentais, a temperatura de saída do fluido foi medida apenas num ponto (só foi colocado um termopar), pelo que se o tentou colocar o mais próximo possível do centro, uma vez que a temperatura retirada das simulações numéricas foi a temperatura do centro da tubagem (centro do fluido). Surge então mais uma fonte de erro, uma vez que existe um gradiente de temperaturas no outlet do fluido. Este gradiente pode ser observado na Figura 6.23.

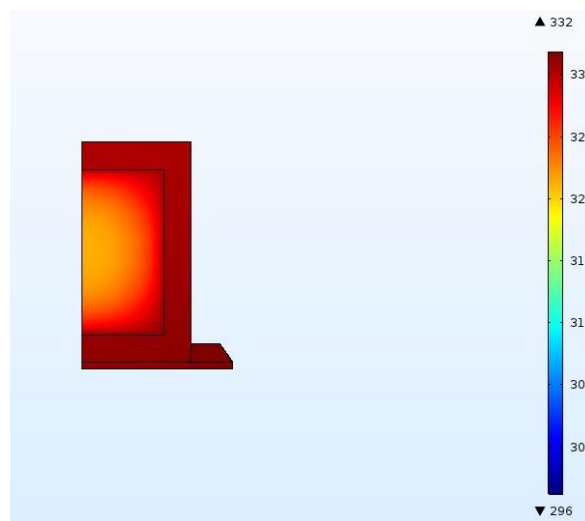


Figura 6. 25: Gradiente de temperaturas presente no fim da tubagem e no outlet.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

No presente trabalho foi estudada a transferência de calor através da utilização de um nanofluido, comparando os resultados com os obtidos utilizando água destilada. Deste modo, realça-se o interesse dos nanofluidos pelo facto de estes apresentarem uma componente sólida dispersa num componente líquido o que eleva os valores da condutividade térmica do fluido. Não obstante, salienta-se o facto de existirem diversos outros fatores responsáveis por este aumento da condutividade térmica. Adicionalmente, foi elaborado um estudo referente à condutividade térmica dos nanofluidos.

Da revisão bibliográfica conclui-se que o aumento da condutividade do nanofluido pode ser explicado por quatro fatores: o movimento Browniano, a aglomeração das nanopartículas, a natureza de transporte das nanopartículas e a estratificação líquido/sólido. Estes fatores são influenciados por diversos parâmetros, sendo que o principal é a aglomeração de nanopartículas, parâmetro este que gera conflito de opiniões entre diversos autores. Deve-se salientar que, uma vez que o tempo decorrido de ensaio com a utilização do nanofluido foi reduzido, não se verificaram problemas relativamente à estabilidade do mesmo.

Para os ensaios experimentais foram utilizados dois fluidos, água destilada e um nanofluido de óxidos de ferro em água destilada com a concentração de 0,2%. Relativamente às nanopartículas de óxido de ferro, estas foram produzidas na Universidade do Minho, através da utilização de uma técnica de síntese por co-precipitação, verificando-se fraca estabilidade.

A tubagem utilizada nos ensaios experimentais é simples e de baixo custo, sendo composta por um tubo em liga de alumínio com uma das extremidades alterada de modo a possibilitar a introdução de um tubo redondo mais pequeno, sem comprometer a estanquicidade. Uma vez que a tubagem é quadrada, a área de contacto entre a resistência térmica e a tubagem ficou bem definida.

Os resultados obtidos experimentalmente revelam maiores transferências de calor aquando da utilização do nanofluido em comparação com a água destilada. Não se verificou a deposição de nanopartículas na tubagem nem o seu entupimento em contraste com outros

nanofluidos testados em ensaios preliminares. Uma vez que o calor específico do nanofluido é mais baixo que o da água destilada, facilmente se conclui que a transferência de calor se viu potenciada com o nanofluido pelo facto de este possuir uma maior condutividade térmica, que por sua vez contribui para um maior coeficiente de transferência de calor por convecção.

Relativamente à simulação numérica, esta possibilitou uma análise ao comportamento térmico e hidrodinâmico da geometria representativa da tubagem utilizada. A divergência de resultados existente entre os obtidos experimentalmente e os obtidos numericamente, pode dever-se a vários fatores: as propriedades pré-definidas pelo *software* afastam-se das propriedades utilizadas para os cálculos; a temperatura de saída do fluido nos ensaios experimentais é medida apenas num ponto, negligenciando a existência de um perfil de temperaturas; nos ensaios experimentais não é garantido 100% o contacto entre a resistência térmica e a tubagem; nos ensaios experimentais, ainda que com a colocação de uma placa de poliuretano sobre a tubagem, não se conseguiu garantir 100% de isolamento da tubagem.

Foram ainda realizados ensaios experimentais conduzidos por forma a determinar a condutividade térmica dos nanofluidos, uma vez que ainda não existe consenso no que toca à determinação desta propriedade em nanofluidos. A função normal do equipamento utilizado é a de medir a condutividade de materiais sólidos e, como tal, foi necessária uma adaptação. No entanto, os resultados obtidos para os materiais sólidos foram inconclusivos e, por este motivo, este sistema não foi testado para medir a condutividade térmica dos nanofluidos.

Adicionalmente, no Bragantia Eco Park, em Bragança, procedeu-se à medição da condutividade térmica através de um equipamento que se baseia na técnica da fonte plana transiente. Foram realizadas medições para três fluidos diferentes, sendo estes, água destilada, um nanofluido funcionalizado (utilizado nos ensaios experimentais) e um nanofluido não-funcionalizado, sendo que ambos os nanofluidos são de Fe_3O_4 em água destilada, com a concentração de 0,2%. Em termos gerais, os resultados permitiram concluir que os valores da condutividade térmica água destilada são inferiores aos obtidos com os nanofluidos. Adicionalmente, verificou-se que com o aumento da temperatura, o nanofluido funcionalizado apresenta valores superiores aos do nanofluido não-funcionalizado. No entanto, foi também verificado que, à temperatura ambiente, este comportamento não se verificou.

7.2 Trabalhos Futuros

No presente trabalho apresentam-se alguns resultados que requerem melhorias. Como tal, permanecem lugares para melhoramentos das metodologias utilizadas, assim como também existem outras vias de trabalho capazes de legitimar as conclusões retiradas e de tornar possível a aquisição de resultados mais conclusivos. Deste modo, apresentam-se de seguida algumas sugestões para trabalhos futuros:

Uma vez que a colocação de termopares no interior da tubagem apresenta extrema dificuldade, uma alternativa passa pela utilização de termografia no estudo da transferência de calor. Deste modo, não só será possível retirar valores de temperatura em lugares mais difíceis, como também possibilitará a determinação da temperatura em vários pontos sem ocorrer a necessidade do uso de vários termopares.

Ensaio experimentais executados num local com um ambiente controlado termicamente. Adicionalmente, procurar aumentar o contacto existente entre a resistência térmica e a tubagem e melhorar o isolamento térmico da mesma. A colocação de termopares ao longo do tubo também apresenta interesse, uma vez que possibilita uma melhor descrição da transferência de calor ao longo do tubo.

Assim, é também possível melhorar o tratamento analítico dos dados uma vez que será possível verificar experimentalmente a variação da temperatura quer da tubagem, quer do fluido, ao longo do seu comprimento e, deste modo, aperfeiçoar os cálculos efetuados.

A tecnologia de bombeamento utilizada recorre apenas a tubagens de seringas, a uma bomba de seringa e a uma seringa. Desta maneira, seria interessante a utilização de uma bomba peristáltica, com recurso a tubagens e a ligações melhores, com medidores de pressão em lugares estratégicos, por forma a garantir um regime estacionário.

As simulações numéricas foram apenas realizadas para um fluido monofásico, a água. Desta forma, existe a necessidade da realização de simulações numéricas utilizando nanofluidos. Adicionalmente, uma vez que as propriedades termofísicas dos nanofluidos dependem de diversos fatores, incluindo a aglomeração das nanopartículas e a sua deposição, seria interessante que as simulações numéricas se realizassem recorrendo a fluidos bifásicos.

Não existindo ainda um consenso relativamente às metodologias existentes para previsão da condutividade térmica dos nanofluidos, e uma vez que as tecnologias existentes capazes de desempenhar essa função de forma prática estão associadas a grandes custos,

Conclusões e trabalhos futuros

torna-se imprescindível a elaboração de uma tecnologia simples e de custo reduzido capaz de as substituir.

Os ensaios experimentais efetuados no Bragantia Eco Park, deverão ser repetidos, uma vez que parte dos resultados se revelaram inconsistentes.

Relativamente à estabilidade dos nanofluidos ainda não existe nenhum modelo capaz de a prever. Deste modo, seria vantajosa a elaboração de uma formulação capaz de relacionar a estabilidade dos nanofluidos com o tempo a que estão sujeitos a ultrassons, com a quantidade de surfactante, com o tamanho, tipo e forma das nanopartículas e com o fluido base utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aberoumand, S., H. Aberoumand, e K. Javaherdeh. 2013. «Improve heat transfer by using nanofluids: a review». *Am J Adv Sci Res* 1: 375–86.
- Aghabozorg, Mohammad Hossein, Alimorad Rashidi, e Saber Mohammadi. 2016. «Experimental investigation of heat transfer enhancement of Fe₂O₃-CNT/water magnetic nanofluids under laminar, transient and turbulent flow inside a horizontal shell and tube heat exchanger». *Experimental Thermal and Fluid Science* 72 (Abril): 182–89. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.011>.
- Akhavan-Behabadi, M.A., M.K. Sadoughi, Milad Darzi, e M. Fakoor-Pakdaman. 2015. «Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of R600a/POE/CuO Nano-Refrigerant Flow Condensation». *Experimental Thermal and Fluid Science* 66 (Setembro): 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.02.027>.
- Alawi, Omer A., Jassim Mohammed Salih, e A. R. Mallah. 2019. «Thermo-physical properties effectiveness on the coefficient of performance of Al₂O₃/R141b nano-refrigerant». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 103 (Abril): 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.011>.
- Ali, M., A. M. El-Leathy, e Z. Al-Sofyany. 2014. «The Effect of Nanofluid Concentration on the Cooling System of Vehicles Radiator». *Advances in Mechanical Engineering* 6 (Janeiro): 962510. <https://doi.org/10.1155/2014/962510>.
- Amin, Toghi Eshghi, Ghasempour Roghayeh, Razi Fatemeh, e Pourfayaz Fatollah. 2015. «Evaluation of Nanoparticle Shape Effect on a Nanofluid Based Flat-Plate Solar Collector Efficiency». *Energy Exploration & Exploitation* 33 (5): 659–76. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.5.659>.
- Batchelor, G. K. 1977. «The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles». *Journal of Fluid Mechanics* 83 (01): 97. <https://doi.org/10.1017/S0022112077001062>.
- Beck, Michael P., Tongfan Sun, e Aryn S. Teja. 2007. «The Thermal Conductivity of Alumina Nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol». *Fluid Phase Equilibria* 260 (2): 275–78. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.034>.
- Begüm Elç loğ Lu, Elif, e Tuba Okutucu-Özyurt. 2016. «An experimental study on the dispersion stability of alumina-water nanofluids via particle size distribution and zeta potential measurements». *High Temperatures -- High Pressures* 45 (3): 239–50.
- Bigdeli, Masoud Bozorg, Matteo Fasano, Annalisa Cardellini, Eliodoro Chiavazzo, e Pietro Asinari. 2016. «A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (Julho): 1615–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.027>.
- Brinkman, H. C. 1952. «The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions». *The Journal of Chemical Physics* 20 (4): 571–571. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>.
- Buschmann, Matthias H. 2013. «Nanofluids in Thermosyphons and Heat Pipes: Overview of Recent Experiments and Modelling Approaches». *International Journal of Thermal Sciences* 72 (Outubro): 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.024>.
- Cengel Yunus, A. 2003. *Heat transfer: a practical approach*. McGraw-Hill New York.

Chavan, Durgeshkumar, e Ashok T. Pise. 2013. «Performance Investigation of an Automotive Car Radiator Operated With Nanofluid as a Coolant». *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 6 (2): 021010. <https://doi.org/10.1115/1.4025230>.

Che Sidik, Nor Azwadi, Muhammad Noor Afiq Witri Mohd Yazid, e Rizalman Mamat. 2017. «Recent advancement of nanofluids in engine cooling system». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (Agosto): 137–44. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.057>.

Choi, C., H.S. Yoo, e J.M. Oh. 2008. «Preparation and Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-Transformer Oil Dispersions as Advanced Energy-Efficient Coolants». *Current Applied Physics* 8 (6): 710–12. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.04.060>.

Chon, Chan Hee, Kenneth D. Kihm, Shin Pyo Lee, e Stephen U. S. Choi. 2005. «Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement». *Applied Physics Letters* 87 (15): 153107-. <https://doi.org/10.1063/1.2093936>.

Chougule, Sandesh S., e S. K. Sahu. 2014. «Comparative Study of Cooling Performance of Automobile Radiator Using Al₂O₃-Water and Carbon Nanotube-Water Nanofluid». *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine* 5 (1): 010901. <https://doi.org/10.1115/1.4026971>.

Colangelo, G., E. Favale, M. Milanese, A. de Risi, e D. Laforgia. 2017. «Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution». *Applied Thermal Engineering* 127 (Dezembro): 421–35. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042>.

Corcione, Massimo. 2011. «Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids». *Energy Conversion and Management* 52 (1): 789–93. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.072>.

Das, Pritam Kumar. 2017. «A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids». *Journal of Molecular Liquids* 240 (Agosto): 420–46. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.071>.

Das, Sarit K. 2006. «Nanofluids—The Cooling Medium of the Future». *Heat Transfer Engineering* 27 (10): 1–2. <https://doi.org/10.1080/01457630600904585>.

Daviran, Samaneh, Alibakhsh Kasaeian, Hamed Tahmooressi, Alimorad Rashidi, Dongsheng Wen, e Omid Mahian. 2017. «Evaluation of clustering role versus Brownian motion effect on the heat conduction in nanofluids: A novel approach». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 108 (Maio): 822–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.071>.

De Robertis, E., E.H.H. Cosme, R.S. Neves, A.Yu. Kuznetsov, A.P.C. Campos, S.M. Landi, e C.A. Achete. 2012. «Application of the Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry Technique for the Determination of the Specific Heat of Copper Nanofluids». *Applied Thermal Engineering* 41 (Agosto): 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.003>.

Department of Mechanical Engineering, Amrita School of Engineering Amrita VishwaVidyapeetham, Coimbatore, India, K.P. Vasudevan Nambeesan, R. Parthiban, Department of Mechanical Engineering, Amrita School of Engineering Amrita VishwaVidyapeetham, Coimbatore, India, K. Ram Kumar, Department of Mechanical Engineering, Amrita School of Engineering Amrita VishwaVidyapeetham, Coimbatore, India, U.R. Athul, et al. 2015. «Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in Automobile Radiator Using Al₂O₃/Water–Ethylene Glycol Nanofluid Coolants». *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 12 (Dezembro): 2857–65. <https://doi.org/10.15282/ijame.12.2015.5.0240>.

Duangthongsuk, Weerapun, e Somchai Wongwises. 2009. «Measurement of Temperature-Dependent Thermal Conductivity and Viscosity of TiO₂-Water Nanofluids». *Experimental Thermal and Fluid Science* 33 (4): 706–14. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.01.005>.

- Einstein, Albert. 1906. «A new determination of molecular dimensions». *Ann. Phys.* 19: 289–306.
- . 1956. *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Courier Corporation.
- Evans, William, Ravi Prasher, Jacob Fish, Paul Meakin, Patrick Phelan, e Pawel Keblinski. 2008. «Effect of Aggregation and Interfacial Thermal Resistance on Thermal Conductivity of Nanocomposites and Colloidal Nanofluids». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (5–6): 1431–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.017>.
- Everett, Douglas H. 1988. *Basic Principles of Colloid Science*. <https://doi.org/10.1039/9781847550200>.
- Fakoor Pakdaman, M., M.A. Akhavan-Behabadi, e P. Razi. 2012. «An Experimental Investigation on Thermo-Physical Properties and Overall Performance of MWCNT/Heat Transfer Oil Nanofluid Flow inside Vertical Helically Coiled Tubes». *Experimental Thermal and Fluid Science* 40 (Julho): 103–11. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.02.005>.
- Frankel, N.A., e Andreas Acrivos. 1967. «On the Viscosity of a Concentrated Suspension of Solid Spheres». *Chemical Engineering Science* 22 (6): 847–53. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(67\)80149-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(67)80149-0).
- Ghadimi, A., R. Saidur, e H.S.C. Metselaar. 2011. «A Review of Nanofluid Stability Properties and Characterization in Stationary Conditions». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (17–18): 4051–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014>.
- Ghadimi, Azadeh, e Ibrahim Henk Metselaar. 2013. «The Influence of Surfactant and Ultrasonic Processing on Improvement of Stability, Thermal Conductivity and Viscosity of Titania Nanofluid». *Experimental Thermal and Fluid Science* 51 (Novembro): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.06.001>.
- Ghazvini, M., M. A. Akhavan-Behabadi, E. Rasouli, e M. Raisee. 2012. «Heat Transfer Properties of Nanodiamond–Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow». *Heat Transfer Engineering* 33 (6): 525–32. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.624858>.
- Gonzalez, C. 2015. «What’s the difference between conduction, convection, and radiation». *Machine Design*: <http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-conduction-convectionand-radiation>.
- Gothäll, Hanna. 2017. «How to Inspect Your Mesh in COMSOL Multiphysics®». *COMSOL Multiphysics* (blog). 2017. <https://www.comsol.com/blogs/how-to-inspect-your-mesh-in-comsol-multiphysics>.
- Grab, Thomas, Ulrich Gross, Uwe Franzke, e Matthias H. Buschmann. 2014. «Operation Performance of Thermosyphons Employing Titania and Gold Nanofluids». *International Journal of Thermal Sciences* 86 (Dezembro): 352–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.019>.
- Hasanuzzaman, M., N. A. Rahim, R. Saidur, e S. N. Kazi. 2011. «Energy savings and emissions reductions for rewinding and replacement of industrial motor». *Energy* 36 (1): 233–40. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.046>.
- Huc, Nicolas. 2014. «Conjugate Heat Transfer». *COMSOL Multiphysics* (blog). 2014. <https://www.comsol.com/blogs/conjugate-heat-transfer/>.
- Hwang, Y., J. K. Lee, C. H. Lee, Y. M. Jung, S. I. Cheong, C. G. Lee, B. C. Ku, e S. P. Jang. 2007. «Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids». *Thermochimica Acta*, 6th KSTP Symposium, 455 (1): 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.036>.
- Jang, Seok Pil, e Stephen U. S. Choi. 2004a. «Free Convection in a Rectangular Cavity (Benard Convection) With Nanofluids». (*:unav*). <https://doi.org/10.1115/imece2004-61054>.

- . 2004b. «Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids». *Applied Physics Letters* 84 (21): 4316–18. <https://doi.org/10.1063/1.1756684>.
- Jiang, Linqin, Lian Gao, e Jing Sun. 2003. «Production of Aqueous Colloidal Dispersions of Carbon Nanotubes». *Journal of Colloid and Interface Science* 260 (1): 89–94. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(02\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(02)00176-5).
- Jiang, Weiting, Guoliang Ding, e Hao Peng. 2009. «Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants». *International Journal of Thermal Sciences* 48 (6): 1108–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.012>.
- Kabir, Md. E., M.C. Saha, e S. Jeelani. 2007. «Effect of Ultrasound Sonication in Carbon Nanofibers/Polyurethane Foam Composite». *Materials Science and Engineering: A* 459 (1–2): 111–16. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.031>.
- Kannan, C, T Raja Jayasingh, M Vinoth, e T Vijayakumar. sem data. «An Experimental Study on the Influence of Operating Parameters on the Heat Transfer Characteristics of an Automotive Radiator with Nano Fluids» 2 (3): 5.
- «Kapton Sensors». -. Hot Disk. -. <https://www.hotdiskinstruments.com/products-services/sensors/kapton-sensors/>.
- Kablinski, P, S. R Phillpot, S. U. S Choi, e J. A Eastman. 2002. «Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (4): 855–63. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2).
- Kim, Jake, Yong Tae Kang, e Chang Kyun Choi. 2007. «Soret and Dufour Effects on Convective Instabilities in Binary Nanofluids for Absorption Application». *International Journal of Refrigeration*, 6.
- Kole, Madhusree, e T.K. Dey. 2012. «Effect of Prolonged Ultrasonication on the Thermal Conductivity of ZnO–Ethylene Glycol Nanofluids». *Thermochimica Acta* 535 (Maio): 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.016>.
- Kolen'ko, Yury V., Manuel Bañobre-López, Carlos Rodríguez-Abreu, Enrique Carbó-Argibay, Alexandra Sailsman, Yolanda Piñeiro-Redondo, M. Fátima Cerqueira, et al. 2014. «Large-Scale Synthesis of Colloidal Fe₃O₄ Nanoparticles Exhibiting High Heating Efficiency in Magnetic Hyperthermia». *The Journal of Physical Chemistry C* 118 (16): 8691–8701. <https://doi.org/10.1021/jp500816u>.
- Koo, Junemoo, e Clement Kleinstreuer. 2004. «A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids». *Journal of Nanoparticle Research* 6 (6): 577–88. <https://doi.org/10.1007/s11051-004-3170-5>.
- Kumar, D. Hemanth, Hrishikesh E. Patel, V. R. Rajeev Kumar, T. Sundararajan, T. Pradeep, e Sarit K. Das. 2004. «Model for Heat Conduction in Nanofluids». *Physical Review Letters* 93 (14). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.144301>.
- Kumar, Nishant, e Shriram S. Sonawane. 2016. «Experimental study of Fe₂O₃/water and Fe₂O₃/ethylene glycol nanofluid heat transfer enhancement in a shell and tube heat exchanger». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 78 (Novembro): 277–84. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.009>.
- Kwak, Kiyuel, e Chongyup Kim. 2005. «Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol». *Korea-Australia Rheology Journal* 17 (2): 35–40.
- Lam, Chun-ki, Kin-tak Lau, Hoi-yan Cheung, e Hang-yin Ling. 2005. «Effect of Ultrasound Sonication in Nanoclay Clusters of Nanoclay/Epoxy Composites». *Materials Letters* 59 (11): 1369–72. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.12.048>.

- Lee, Jaeseon, e Issam Mudawar. 2007. «Assessment of the Effectiveness of Nanofluids for Single-Phase and Two-Phase Heat Transfer in Micro-Channels». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (3–4): 452–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.001>.
- Lee, Ji-Hwan, Kyo Sik Hwang, Seok Pil Jang, Byeong Ho Lee, Jun Ho Kim, Stephen U. S. Choi, e Chul Jin Choi. 2008. «Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (11): 2651–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.026>.
- Lee, S., S. U.-S. Choi, S. Li, e J. A. Eastman. 1999. «Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles». *Journal of Heat Transfer* 121 (2): 280–89. <https://doi.org/10.1115/1.2825978>.
- Li, Calvin H., e G. P. Peterson. 2006. «Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)». *Journal of Applied Physics* 99 (8): 084314. <https://doi.org/10.1063/1.2191571>.
- Liu, Min-Sheng, Mark Ching-Cheng Lin, I-Te Huang, e Chi-Chuan Wang. 2005. «Enhancement of Thermal Conductivity with Carbon Nanotube for Nanofluids». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32 (9): 1202–10. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005>.
- Lo, Chih-Hung, Tsing-Tshih Tsung, e Hong-Ming Lin. 2007. «Preparation of Silver Nanofluid by the Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System (SANSS)». *Journal of Alloys and Compounds* 434–435 (Maio): 659–62. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.08.217>.
- Lobarinhas, Pedro. 2015. «Métodos Numéricos na Transferência de Calor». Guimarães.
- Lobarinhas, Pedro, e Eduardo Ferreira. 2006. Review of *Determinação de Propriedades Térmicas de Materiais*, revisto por Francisco Brito.
- Mahbubul, I. M. 2019a. «4 - Thermophysical Properties of Nanofluids». Em *Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid*, editado por I. M. Mahbubul, 113–96. Micro and Nano Technologies. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813245-6.00004-6>.
- Mahbubul, I. M., R. Saidur, e M. A. Amalina. 2012a. «Investigation of Viscosity of R123-TIO 2 Nanorefrigerant». *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 7: 146–51.
- . 2013. «Influence of particle concentration and temperature on thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/R141b nanorefrigerant». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 43 (Abril): 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.02.004>.
- Mahbubul, I.M. 2019b. «Introduction to Nanofluid». Em *Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid*, 1–13. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813245-6.00001-0>.
- . 2019c. «Stability and Dispersion Characterization of Nanofluid». Em *Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid*, 47–112. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813245-6.00003-4>.
- Mahbubul, I.M., R. Saidur, e M.A. Amalina. 2012b. «Latest Developments on the Viscosity of Nanofluids». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (4): 874–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>.
- Mahbubul, I.M., R. Saidur, M.A. Amalina, E.B. Elcioglu, e T. Okutucu-Ozyurt. 2015. «Effective Ultrasonication Process for Better Colloidal Dispersion of Nanofluid». *Ultrasonics Sonochemistry* 26 (Setembro): 361–69. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.01.005>.
- Mahbubul, I.M., R. Saidur, A. Hepbasli, e M.A. Amalina. 2016. «Experimental Investigation of the Relation between Yield Stress and Ultrasonication Period of Nanofluid». *International Journal of Heat*

Mahbulbul, I.M., I.M. Shahrul, S.S. Khaleduzzaman, R. Saidur, M.A. Amalina, e A. Turgut. 2015. «Experimental Investigation on Effect of Ultrasonication Duration on Colloidal Dispersion and Thermophysical Properties of Alumina–Water Nanofluid». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88 (Setembro): 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.048>.

Mahian, Omid, Ali Kianifar, Clement Kleinstreuer, Moh'd A. Al-Nimr, Ioan Pop, e Ahmet Z. Sahin. 2013. «A Review of Entropy Generation in Nanofluid Flow». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65 (Outubro): 514–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.010>.

Mamat, Hussin. 2019. «Nanofluids: Thermal Conductivity and Applications». Em *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11569-3>.

Mandzy, N., E. Grulke, e T. Druffel. 2005. «Breakage of TiO₂ Agglomerates in Electrostatically Stabilized Aqueous Dispersions». *Powder Technology* 160 (2): 121–26. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.08.020>.

Mangrulkar, Chidanand K., e Vilayatral M. Kriplani. 2013. «Nanofluid heat transfer-a review». *International Journal of Engineering and Technology* 3 (2): 136–142.

Masoumi, N, N Sohrabi, e A Behzadmehr. 2009. «A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids». *Journal of Physics D: Applied Physics* 42 (5): 055501. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/055501>.

Mintsa, Honorine Angue, Gilles Roy, Cong Tam Nguyen, e Dominique Doucet. 2009. «New Temperature Dependent Thermal Conductivity Data for Water-Based Nanofluids». *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2): 363–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.009>.

Mishra, Purna Chandra, Sayantan Mukherjee, Santosh Kumar Nayak, e Arabind Panda. 2014. «A Brief Review on Viscosity of Nanofluids». *International Nano Letters* 4 (4): 109–20. <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>.

Mohammed, H. A., P. Gunnasegaran, e N. H. Shuaib. 2011. «The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (6): 767–73. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.03.024>.

Molaie, M. M., J. Akbari, e M. R. Movahhedy. 2016. «Ultrasonic assisted grinding process with minimum quantity lubrication using oil-based nanofluids». *Journal of Cleaner Production* 129 (Agosto): 212–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.080>.

Murshed, S. M. S., K. C. Leong, e C. Yang. 2009. «A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids». *Applied Thermal Engineering* 29 (11): 2477–83. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.018>.

Namburu, Praveen K., Debendra K. Das, Krishna M. Tanguturi, e Ravikanth S. Vajjha. 2009. «Numerical Study of Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids Considering Variable Properties». *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2): 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.01.001>.

Namburu, Praveen K., Devdatta P. Kulkarni, Debasmita Misra, e Debendra K. Das. 2007. «Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture». *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2): 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2007.05.001>.

Nan, C.-W., Z. Shi, e Y. Lin. 2003. «A Simple Model for Thermal Conductivity of Carbon Nanotube-Based Composites». *Chemical Physics Letters* 375 (5–6): 666–69. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)00956-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)00956-4).

Narei, Hamid, Roghayeh Ghasempour, e Younes Noorollahi. 2016. «The Effect of Employing Nanofluid on Reducing the Bore Length of a Vertical Ground-Source Heat Pump». *Energy Conversion and Management* 123 (Setembro): 581–91. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.079>.

Nguyen, C. T., F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, T. Maré, S. Boucher, e H. Angue Mintsa. 2007. «Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – Hysteresis phenomenon». *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Revised and extended papers from the 5th conference in Turbulence, Heat and Mass Transfer, 28 (6): 1492–1506. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.02.004>.

Nguyen, Van Son, Didier Rouxel, Rachid Hadji, Brice Vincent, e Yves Fort. 2011. «Effect of Ultrasonication and Dispersion Stability on the Cluster Size of Alumina Nanoscale Particles in Aqueous Solutions». *Ultrasonics Sonochemistry* 18 (1): 382–88. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.07.003>.

Nielsen, Lawrence E. 1970. «Generalized Equation for the Elastic Moduli of Composite Materials». *Journal of Applied Physics* 41 (11): 4626–27. <https://doi.org/10.1063/1.1658506>.

Özcan-Taşkin, N. Gül, Gustavo Padron, e Adam Voelkel. 2009. «Effect of Particle Type on the Mechanisms of Break up of Nanoscale Particle Clusters». *Chemical Engineering Research and Design* 87 (4): 468–73. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.12.012>.

Pak, Bock Choon, e Young I. Cho. 1998. «HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES». *Experimental Heat Transfer* 11 (2): 151–70. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>.

Pang, Changwei, Jae Won Lee, e Yong Tae Kang. 2015. «Review on combined heat and mass transfer characteristics in nanofluids». *International Journal of Thermal Sciences* 87 (Janeiro): 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.07.017>.

Paul, G., M. Chopkar, I. Manna, e P.K. Das. 2010. «Techniques for Measuring the Thermal Conductivity of Nanofluids: A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (7): 1913–24. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.017>.

Paul, G., S. Sarkar, T. Pal, P.K. Das, e I. Manna. 2012. «Concentration and Size Dependence of Nano-Silver Dispersed Water Based Nanofluids». *Journal of Colloid and Interface Science* 371 (1): 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.11.057>.

Phuoc, Tran X., e Mehrdad Massoudi. 2009. «Experimental Observations of the Effects of Shear Rates and Particle Concentration on the Viscosity of Fe₂O₃–Deionized Water Nanofluids». *International Journal of Thermal Sciences* 48 (7): 1294–1301. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.015>.

Prasher, Ravi, Prajesh Bhattacharya, e Patrick E. Phelan. 2006. «Brownian-Motion-Based Convective-Conductive Model for the Effective Thermal Conductivity of Nanofluids». *Journal of Heat Transfer* 128 (6): 588. <https://doi.org/10.1115/1.2188509>.

Prasher, Ravi, Patrick E. Phelan, e Prajesh Bhattacharya. 2006. «Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid)». *Nano Letters* 6 (7): 1529–34. <https://doi.org/10.1021/nl060992s>.

Puga, Helder. 2015. «CAD/CAE/CAM (1ª)». Guimarães.

- Ramezanizadeh, Mahdi, Mohammad Alhuyi Nazari, Mohammad Hossein Ahmadi, e Emin Açıkkalp. 2018. «Application of nanofluids in thermosyphons: A review». *Journal of Molecular Liquids* 272 (Dezembro): 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.101>.
- Ravi Kumar, N. T., P. Bhramara, Birhanu Mulat Addis, L. Syam Sundar, Manoj K. Singh, e Antonio C. M. Sousa. 2017. «Heat transfer, friction factor and effectiveness analysis of Fe₃O₄/water nanofluid flow in a double pipe heat exchanger with return bend». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 81 (Fevereiro): 155–63. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.12.019>.
- Rocha, César. 2018. «Estudo do arrefecimento em dissipadores de calor com recurso a nanofluidos inovadores».
- Rodrigues, Raquel O., Manuel Bañobre-López, Juan Gallo, Pedro B. Tavares, Adrián M. T. Silva, Rui Lima, e Helder T. Gomes. 2016. «Haemocompatibility of Iron Oxide Nanoparticles Synthesized for Theranostic Applications: A High-Sensitivity Microfluidic Tool». *Journal of Nanoparticle Research* 18 (7): 194. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3498-7>.
- Sadeghi, R., S. Gh. Etemad, E. Keshavarzi, e M. Haghshenasfard. 2015. «Investigation of Alumina Nanofluid Stability by UV–Vis Spectrum». *Microfluidics and Nanofluidics* 18 (5–6): 1023–30. <https://doi.org/10.1007/s10404-014-1491-y>.
- Saidur, R., K. Y. Leong, e H. A. Mohammad. 2011. «A review on applications and challenges of nanofluids». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (3): 1646–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>.
- Sajid, Muhammad Usman, e Hafiz Muhammad Ali. 2019. «Recent Advances in Application of Nanofluids in Heat Transfer Devices: A Critical Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103 (Abril): 556–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057>.
- Samira, Pourfarhang, Zeinali Heris Saeed, Shokrgozar Motahare, e Kahani Mostafa. 2015. «Pressure Drop and Thermal Performance of CuO/Ethylene Glycol (60%)-Water (40%) Nanofluid in Car Radiator». *Korean Journal of Chemical Engineering* 32 (4): 609–16. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0244-7>.
- Sarafraz, M.M., F. Hormozi, e S.M. Peyghambarzadeh. 2016. «Pool Boiling Heat Transfer to Aqueous Alumina Nano-Fluids on the Plain and Concentric Circular Micro-Structured (CCM) Surfaces». *Experimental Thermal and Fluid Science* 72 (Abril): 125–39. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.001>.
- Sarbolookzadeh Harandi, Saeed, Arash Karimipour, Masoud Afrand, Mohammad Akbari, e Annunziata D’Orazio. 2016. «An Experimental Study on Thermal Conductivity of F-MWCNTs–Fe₃O₄/EG Hybrid Nanofluid: Effects of Temperature and Concentration». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 76 (Agosto): 171–77. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.029>.
- Sarkar, Suranjan, e R. Panneer Selvam. 2007. «Molecular Dynamics Simulation of Effective Thermal Conductivity and Study of Enhanced Thermal Transport Mechanism in Nanofluids». *Journal of Applied Physics* 102 (7): 074302. <https://doi.org/10.1063/1.2785009>.
- Sarviya, R.M., e Veeresh Fuskele. 2017. «Review on Thermal Conductivity of Nanofluids». *Materials Today: Proceedings* 4 (2): 4022–31. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.304>.
- Shahrul, I. M., I. M. Mahbulul, S. S. Khaleduzzaman, R. Saidur, e M. F. M. Sabri. 2014. «A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (Outubro): 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.081>.
- Shin, Donghyun, e Debjyoti Banerjee. 2011. «Enhancement of Specific Heat Capacity of High-Temperature Silica-Nanofluids Synthesized in Alkali Chloride Salt Eutectics for Solar Thermal-Energy

Storage Applications». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (5–6): 1064–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.017>.

Subudhi, Sudhakar, e Aditya Kumar. 2019. «Application of Nanofluids for Radiator Cooling». Em *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, B9780128035818115000. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11463-8>.

Sun, Bin, Cheng Peng, Ruiliang Zuo, Di Yang, e Hongwei Li. 2016. «Investigation on the flow and convective heat transfer characteristics of nanofluids in the plate heat exchanger». *Experimental Thermal and Fluid Science* 76 (Setembro): 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.03.005>.

Syam Sundar, L., Manoj K. Singh, e Antonio C.M. Sousa. 2013. «Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Fe₃O₄ Nanofluid for Heat Transfer Applications». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 44 (Maio): 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.02.014>.

Taurozzi, J.S., V.A. Hackley, e M.R. Wiesner. 2012. «Preparation of Nanoparticle Dispersions from Powdered Material Using Ultrasonic Disruption - Version 1.1». NIST SP 1200-2. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1200-2>.

Teixeira, José. 2012. «Mecânica dos Fluidos». Guimarães.

Teng, Tun-Ping, Yi-Hsuan Hung, Tun-Chien Teng, Huai-En Mo, e How-Gao Hsu. 2010. «The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity». *Applied Thermal Engineering* 30 (14): 2213–18. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.036>.

Touloukian, Yeram S. 1970. «Thermophysical Properties of Matter». MIT.

Tseng, Wenjea J., e Kuang-Chih Lin. 2003. «Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions». *Materials Science and Engineering: A* 355 (1): 186–92. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00063-7).

Tuckerman, D.B., e R.F.W. Pease. 1981. «High-performance heat sinking for VLSI». *IEEE Electron Device Letters* 2 (5): 126–29. <https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>.

Tullius, Jami F., Robert Vajtai, e Yildiz Bayazitoglu. 2011. «A Review of Cooling in Microchannels». *Heat Transfer Engineering* 32 (7–8): 527–41. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.506390>.

Tyagi, Himanshu, Patrick Phelan, e Ravi Prasher. 2009. «Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector». *Journal of Solar Energy Engineering* 131 (4): 041004-041004–7. <https://doi.org/10.1115/1.3197562>.

V., Elena. 2011. «Nanofluids for Heat Transfer – Potential and Engineering Strategies». Em *Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling*, editado por Amimul Ahsan. InTech. <https://doi.org/10.5772/22158>.

Vajjha, Ravikanth S., e Debendra K. Das. 2009. «Specific Heat Measurement of Three Nanofluids and Development of New Correlations». *Journal of Heat Transfer* 131 (7): 071601. <https://doi.org/10.1115/1.3090813>.

———. 2012. «A Review and Analysis on Influence of Temperature and Concentration of Nanofluids on Thermophysical Properties, Heat Transfer and Pumping Power». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (15–16): 4063–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048>.

Vand, Vladimir. 1948. «Viscosity of Solutions and Suspensions. I. Theory». *The Journal of Physical and Colloid Chemistry* 52 (2): 277–99. <https://doi.org/10.1021/j150458a001>.

- Wang, Xiang-Qi, e Arun S. Mujumdar. 2007. «Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review». *International Journal of Thermal Sciences* 46 (1): 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>.
- Wang, Xinwei, Xianfan Xu, e Stephen U. S. Choi. 1999. «Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture». *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (4): 474–80. <https://doi.org/10.2514/2.6486>.
- Wen, Dongsheng, Guiping Lin, Saeid Vafaei, e Kai Zhang. 2009. «Review of Nanofluids for Heat Transfer Applications». *Particuology* 7 (2): 141–50. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007>.
- Whalley, R., e K. M. Ebrahimi. 2018. «Heat exchanger dynamic analysis». *Applied Mathematical Modelling* 62 (Outubro): 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.04.024>.
- Wu, Shuying, Dongsheng Zhu, Xinfang Li, Hua Li, e Junxi Lei. 2009. «Thermal energy storage behavior of Al₂O₃-H₂O nanofluids». *Thermochimica Acta* 483 (1): 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.11.006>.
- Xie, H., J. Wang, T. Xi, e Y. Liu. 2002a. «[No Title]». *International Journal of Thermophysics* 23 (2): 571–80. <https://doi.org/10.1023/A:1015121805842>.
- . 2002b. «Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles». *International Journal of Thermophysics* 23 (2): 571–80. <https://doi.org/10.1023/A:1015121805842>.
- Xuan, Yimin, e Qiang Li. 2000. «Heat Transfer Enhancement of Nanofluids». *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 (1): 58–64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3).
- Yamada, Etsuro, e Terukazu Ota. 1980. «Effective Thermal Conductivity of Dispersed Materials». *Wärme- Und Stoffübertragung* 13 (1–2): 27–37. <https://doi.org/10.1007/BF00997630>.
- Yousefi, T., S. A. Mousavi, B. Farahbakhsh, e M. Z. Saghir. 2013. «Experimental investigation on the performance of CPU coolers: Effect of heat pipe inclination angle and the use of nanofluids». *Microelectronics Reliability* 53 (12): 1954–61. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.06.012>.
- Yu, W., e S.U.S. Choi. 2003. «The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model». *Journal of Nanoparticle Research* 5 (1/2): 167–71. <https://doi.org/10.1023/A:1024438603801>.
- Yu, W., D. M. France, S. U. S. Choi, e J. L. Routbort. 2007. «Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications.» ANL/ESD/07-9, 919327. <https://doi.org/10.2172/919327>.
- Zeinali Heris, S., S. Gh. Etemad, e M. Nasr Esfahany. 2006. «Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (4): 529–35. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.01.005>.
- Zhou, Le-Ping, Bu-Xuan Wang, Xiao-Feng Peng, Xiao-Ze Du, e Yong-Ping Yang. 2010. «On the Specific Heat Capacity of CuO Nanofluid». *Advances in Mechanical Engineering* 2 (Janeiro): 172085. <https://doi.org/10.1155/2010/172085>.
- Zhou, Sheng-Qi, e Rui Ni. 2008. «Measurement of the specific heat capacity of water-based Al₂O₃ nanofluid». *Applied Physics Letters* 92 (9): 093123.

ANEXO I – CONVERGÊNCIA DE MALHA

Uma vez que uma malha inadequada tem como consequência resultados da simulação numérica também inadequados, surge a necessidade de proceder a um melhoramento da malha. Este melhoramento é apurado através de um processo de convergência de malha, o qual nos diz qual será o número de elemento constituintes da malha ótimo. A convergência da malha consiste num refinamento da malha, aumentando o número de elementos, e uma verificação dos resultados obtidos. Deve-se parar o refinamento quando os resultados obtidos já não apresentarem diferenças significativas dos resultados obtidos no refinamento anterior.

Neste trabalho, existindo dois modelos físicos, é necessário a elaboração de duas convergências de malha diferentes. Assim, foi realizada a convergência de malha para a componente do escoamento do fluido e para a transferência de calor.

Relativamente ao escoamento, como foi já referido, a malha foi adaptada à dinâmica do fluídos, sendo que desta maneira o próprio software utilizou diferentes tipos de elementos para representação de diferentes zonas. Foram então testados quatro tipos de malha diferentes, sendo que algumas das suas características estão expostas na Tabela II. 1.

Tabela II. 1: Características das malhas utilizadas para o estudo de convergência de malha relativamente ao escoamento do fluido.

| Malha | Coarse | Normal | Fine | Finer |
|---------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Número de elementos | 126249 | 241063 | 667242 | 2334379 |
| Qualidade média | 0,5453 | 0,5699 | 0,5955 | 0,6289 |
| Tempo de simulação | 2min 29s | 4min 20s | 12min 58s | 54min 10s |

Pela Tabela II. 2 verifica-se a existência de uma variação entre o caudal de saída da tubagem e o número de elementos que constituem a malha. A variação existente é, no entanto, cada vez menor até que o número de elementos deixa de ter influência o resultado final. Neste estudo de convergência da malha, o *input* de caudal mássico foi de 4.99002 E-10, sendo que para a malha *Finer* o caudal retirado do software foi abaixo desse valor, justificando deste modo a afirmação anterior.

Tabela II. 2: Tabela representativa da influência do número de elementos no caudal mássico médio.

| Número de Elementos | Caudal Mássico Médio (kg/s) |
|---------------------|-----------------------------|
| 162209 | 4,9885 E-4 |
| 299946 | 4,9894 E-4 |
| 824736 | 4,9909 E-4 |
| 3364928 | 4,9479 E-4 |

Do mesmo modo, um estudo de convergência de malha foi elaborado para o processo de transferência de calor, sendo que para este estudo a variável a medir foi a temperatura do fluido à saída da tubagem. Deste modo, verificou-se a influencia do número de elementos de malha relativamente à temperatura do *outlet*. Foram então testados quatro tipos de malha diferentes, sendo que algumas das suas características estão expostas na Tabela II. 3.

Tabela II. 3: Características das malhas utilizadas para o estudo de convergência de malha relativamente à transferência de calor.

| Malha | Coarse | Normal | Fine | Finer |
|---------------------|---------|----------|----------|--------------|
| Número de elementos | 162209 | 299946 | 824736 | 3364928 |
| Qualidade média | 0,5478 | 0,5585 | 0,5911 | 0,6481 |
| Tempo de simulação | 5min 8s | 8min 43s | 25min 6s | 1h 59min 45s |

Pela Figura II. 1 também se verifica a existência de uma variação entre a temperatura do fluido à saída da tubagem e o número de elementos que constituem a malha. De um modo global, a malha *Finer*, é a que apresenta melhores resultados pelo que será a utilizada nas simulações numéricas.

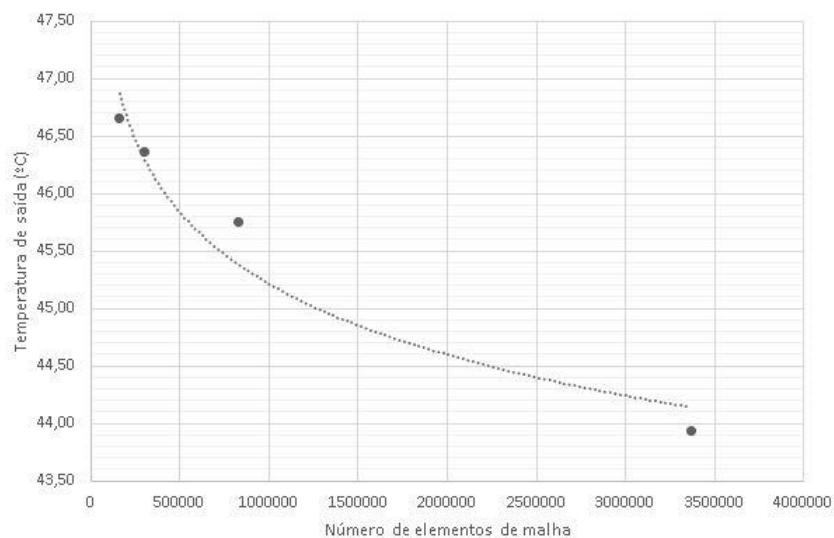


Figura II. 1: Variação da temperatura de saída do fluido de acordo com o número de elementos constituintes da malha.

ANEXO II – CÁLCULO DE H

Experimental - Água

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 50 | 48,65 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,53 | 40,81 | 26,12 | 7,84 | 15,19 | 220,25 | 38,14 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,63 | 39,73 | 26,02 | 8,92 | 15,97 | 228,58 | 41,62 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,55 | 38,67 | 26,10 | 9,98 | 16,77 | 234,58 | 44,84 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 55 | 52,87 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,23 | 45,80 | 30,64 | 7,07 | 16,07 | 268,38 | 49,18 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,99 | 44,67 | 29,88 | 8,20 | 16,77 | 276,08 | 52,78 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,45 | 43,43 | 30,42 | 9,44 | 17,93 | 285,53 | 58,36 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 60 | 58,75 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,05 | 51,17 | 36,70 | 7,58 | 18,46 | 288,66 | 60,75 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,95 | 49,98 | 35,80 | 8,77 | 19,22 | 300,33 | 65,79 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 23,09 | 48,66 | 35,66 | 10,26 | 20,39 | 303,99 | 70,66 |

Experimental – Nanofluido de Fe₃O₄ [0,2%]

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 50 | 48,65 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,62 | 42,94 | 26,03 | 5,71 | 13,39 | 277,60 | 42,39 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,79 | 41,68 | 25,86 | 6,97 | 14,41 | 279,90 | 45,97 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,66 | 40,73 | 25,99 | 7,92 | 15,21 | 289,93 | 50,26 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 55 | 52,87 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,32 | 46,31 | 30,55 | 6,56 | 15,59 | 281,50 | 50,04 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,25 | 45,16 | 30,62 | 7,71 | 16,61 | 294,42 | 55,76 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,58 | 43,93 | 30,29 | 8,94 | 17,50 | 297,73 | 59,38 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m ² K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------|-------|
| | | mL/min | m ³ /s | kg/s | | | | | | | |
| 60 | 58,75 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,33 | 51,82 | 36,42 | 6,93 | 17,77 | 303,62 | 61,52 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,48 | 50,19 | 36,27 | 8,56 | 19,19 | 308,25 | 67,44 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,88 | 49,04 | 35,87 | 9,71 | 20,02 | 318,82 | 72,76 |

Numérico – Água

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m²K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| | | mL/min | m³/s | kg/s | | | | | | | |
| 50 | 48,65 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,53 | 43,94 | 26,12 | 4,71 | 12,50 | 313,50 | 44,67 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,63 | 43,08 | 26,02 | 5,57 | 13,27 | 329,12 | 49,78 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,55 | 42,27 | 26,10 | 6,38 | 14,00 | 343,76 | 54,86 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m²K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| | | mL/min | m³/s | kg/s | | | | | | | |
| 55 | 52,87 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,23 | 47,45 | 30,64 | 5,42 | 14,56 | 317,01 | 52,62 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,99 | 46,54 | 29,88 | 6,33 | 15,18 | 331,35 | 57,32 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 22,45 | 45,45 | 30,42 | 7,42 | 16,30 | 344,29 | 63,98 |

| Tr (°C) | Ts (°C) | q | | | Tin (°C) | Tout (°C) | ΔTin (°C) | ΔTout (°C) | ΔTLM (°C) | h (W/m²K) | Q (W) |
|---------|---------|--------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| | | mL/min | m³/s | kg/s | | | | | | | |
| 60 | 58,75 | 30 | 5,00E-07 | 4,99E-04 | 22,05 | 52,31 | 36,70 | 6,44 | 17,39 | 318,48 | 63,13 |
| | | 35 | 8,33E-07 | 5,82E-04 | 22,95 | 51,10 | 35,80 | 7,65 | 18,24 | 329,50 | 68,52 |
| | | 40 | 6,67E-07 | 6,65E-04 | 23,09 | 50,23 | 35,66 | 8,52 | 18,96 | 349,33 | 75,50 |

Teórico – Água

| Dh (m) | q | | U (m/s) | Re | Nu | Pr | h (W/m²K) |
|--------|--------|----------|----------|------|------|------|-----------|
| | mL/min | m³/s | | | | | |
| 0,006 | 30 | 5,00E-07 | 4,39E-05 | 0,27 | 2,98 | 6,62 | 300,98 |
| 0,006 | 35 | 8,33E-07 | 5,12E-05 | 0,32 | 2,98 | 6,62 | 300,98 |
| 0,006 | 40 | 6,67E-07 | 5,85E-05 | 0,37 | 2,98 | 6,62 | 300,98 |

Teórico – Nanofluido de Fe₃O₄ [0,2%]

| Dh (m) | q | | U (m/s) | Re | Nu | Pr | h (W/m²K) |
|--------|--------|----------|----------|------|------|------|-----------|
| | mL/min | m³/s | | | | | |
| 0,006 | 30 | 5,00E-07 | 4,39E-05 | 0,27 | 2,98 | 6,34 | 307,11 |
| 0,006 | 35 | 8,33E-07 | 5,12E-05 | 0,32 | 2,98 | 6,34 | 307,11 |
| 0,006 | 40 | 6,67E-07 | 5,85E-05 | 0,37 | 2,98 | 6,34 | 307,11 |

ANEXO III – DESENHOS TÉCNICOS

Neste capítulo estão presentes os desenhos técnicos dos provetes maquinados na Universidade do Minho que seriam utilizados na determinação da condutividade térmica de nanofluidos (ver Capítulo 5.3). Na Figura III. 1, encontra-se o desenho técnico correspondente a um provete maciço. Na Figura III. 2, encontra-se o desenho técnico correspondente à peça fêmea constituinte do provete oco, Figura III. 4, sendo que na Figura III. 3, encontra-se o desenho técnico correspondente à peça macho, também constituinte do provete oco. Deve-se salientar que na Figura III. 4 é notória uma folga presente no centro, esta seria preenchida por nanofluido. Para elaboração destes desenhos técnicos foi utilizado o software Autodesk Inventor Professional 2018. Todos estes provetes são constituídos por uma liga de alumínio e todos eles foram perfurados para colocação de três termopares recorrendo a pasta térmica.

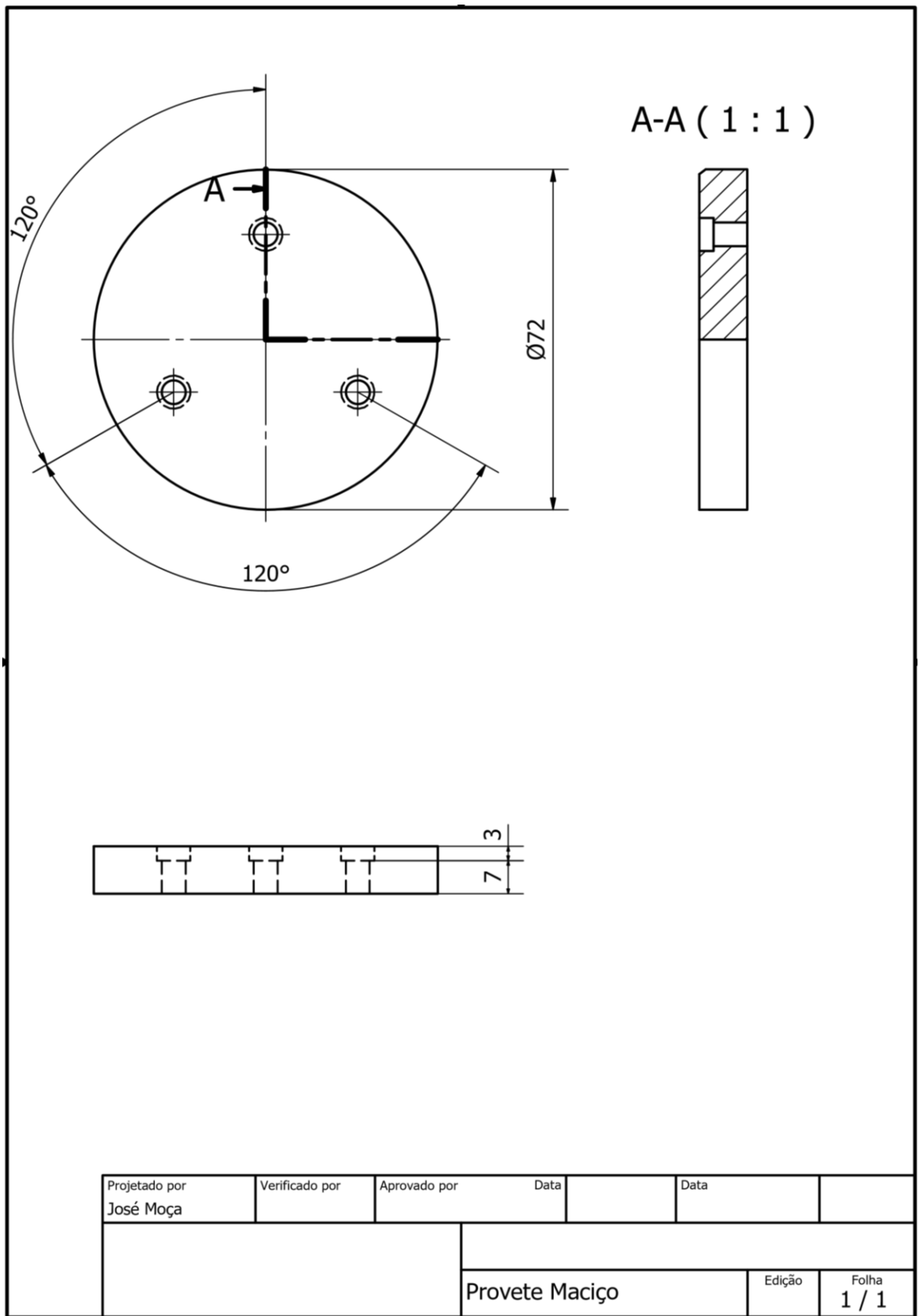


Figura III. 1: Desenho técnico do Provete Maciço.

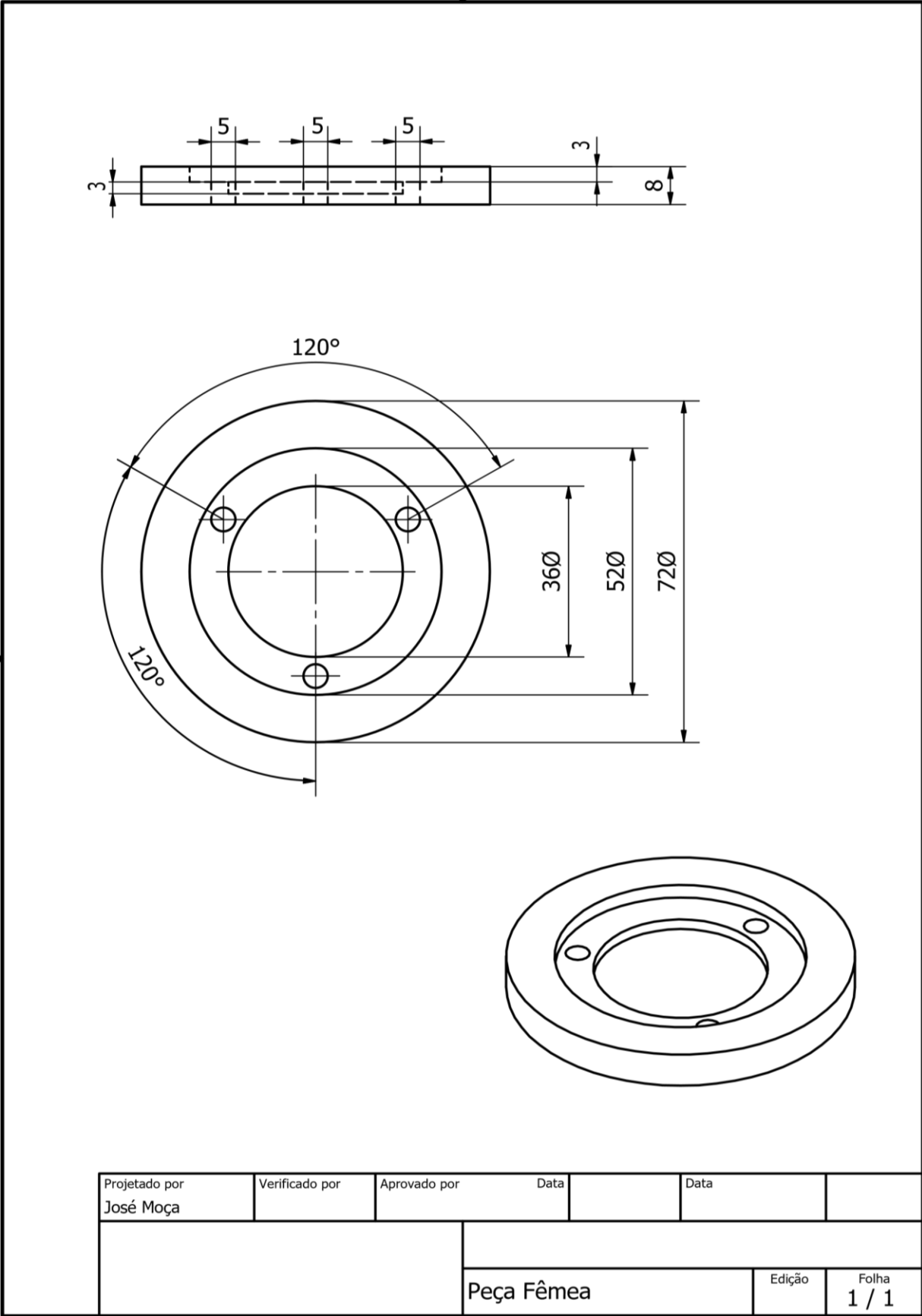


Figura III. 2: Desenho técnico da Peça Fêmea.

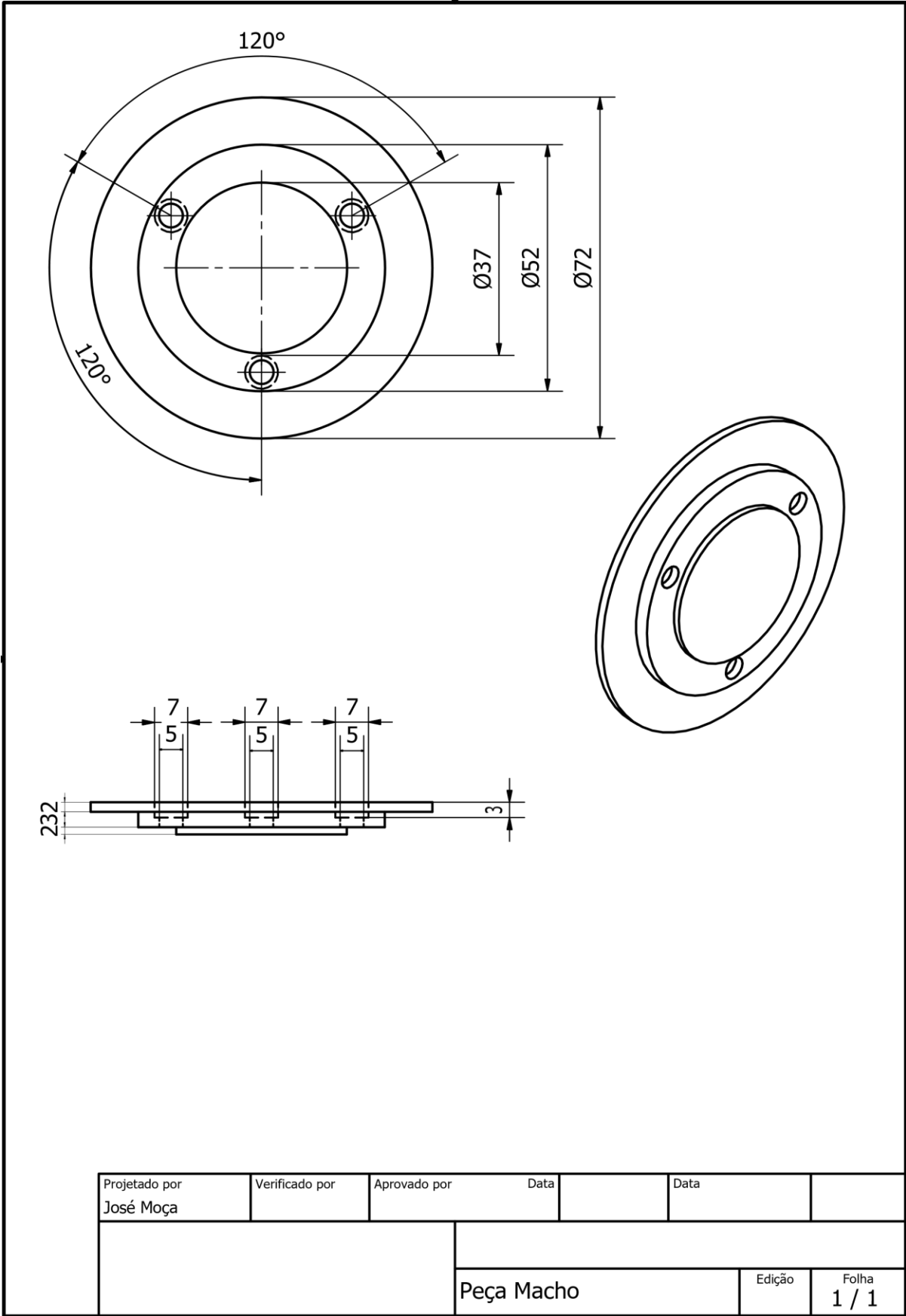


Figura III. 3: Desenho técnico da Peça Macho.

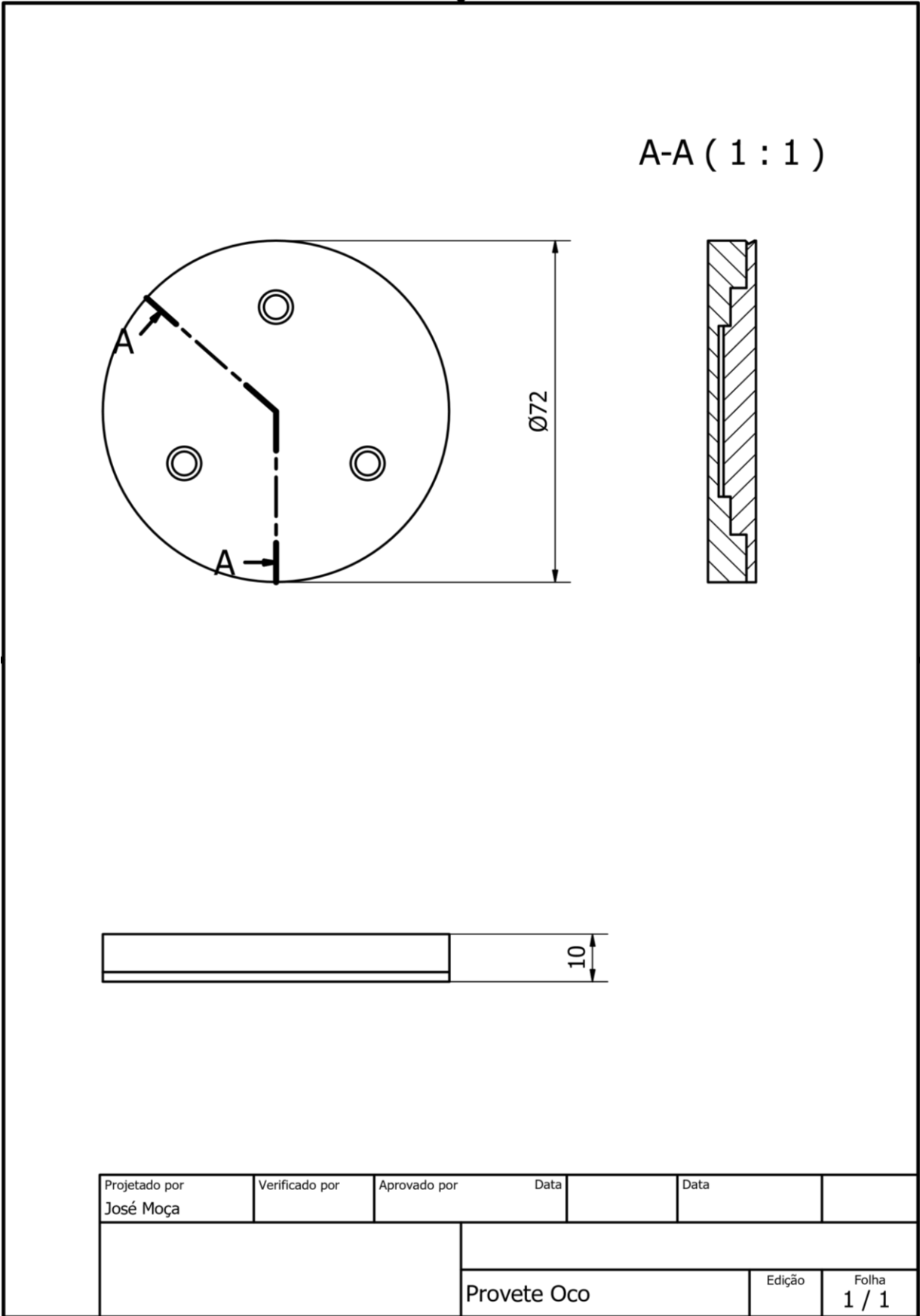


Figura III. 4: Desenho técnico do encaixe entre a Peça Macho e a Peça Fêmea (Provete Oco).