

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

# **Transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos**

Estudo sobre um tubo de um radiador de automóvel

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Rui Filipe da Silva Ribeiro**

Orientadores:

Professor Doutor Armando da Assunção Soares

Professora Doutora Paula Luísa Nunes Braga da Silva



Vila Real, Dezembro 2016



Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

# **Transferência de calor por convecção forçada em nanofluidos**

Estudo sobre um tubo de um radiador de automóvel

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Rui Filipe da Silva Ribeiro**

Orientadores:

Professor Doutor Armando da Assunção Soares

Professora Doutora Paula Luísa Silva

Composição do Júri:

Doutor José Manuel Alves Ribeiro

Doutor Eliseu Leandro Magalhães Monteiro

Doutor Armando da Assunção Soares

Vila Real, Dezembro 2016



*“Depois de termos conseguido subir a uma grande montanha, só descobrimos que existem ainda mais grandes montanhas para subir”*

Nelson Mandela



## **Agradecimentos**

A elaboração desta dissertação tornou-se possível com o apoio de diversas pessoas e a sua colaboração em diferentes fases da mesma, aos quais agradeço profundamente.

Agradecimento muito sincero ao Professor Doutor Armando da Assunção Soares pela orientação e disponibilidade em todo este processo. O apoio e os conselhos sempre presentes, a paciência nas fases mais difíceis, sempre com uma palavra de incentivo e motivação. O seu conhecimento e experiência transmitida foram essenciais para a elaboração deste estudo.

À Professora Doutora Paula Luísa Silva que se mostrou sempre disponível para ajudar e orientar.

A todos os meus amigos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro e da cidade de Vila Real, com quem tive a felicidade de me cruzar nesta etapa e que de alguma forma foram importantes neste meu caminho. Agradecimento também aos amigos de longa data que estão sempre presente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus familiares que sempre acreditaram em mim e se prontificaram para ajudar em qualquer situação.

Por fim, um agradecimento muito especial aos meus pais, António e Maria Aurora, e aos meus irmãos, Tiago e Maria, foram fundamentais por me suportarem em todos os bons e maus momentos, por confiarem em mim, pela paciência, ajuda em todas as situações e por estarem sempre presentes. Um muito obrigado por todo esforço e por acreditarem sempre em mim. Isto só foi possível graças a eles.



## Resumo

Neste trabalho foram usados nanofluidos de água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  e água/ $\text{TiO}_2$  para estudar o seu desempenho na transferência de calor num tubo achatado de um radiador automóvel. As características da transferência de calor dos nanofluidos sujeitos a convecção forçada foram investigadas para concentrações de nanopartículas entre 0,25 e 10,0 % e comparadas com o fluido base (água). A investigação foca-se na comparação do escoamento e da transferência de calor para os casos em que são consideradas as propriedades da água independentes e dependentes da temperatura. Os resultados numéricos obtidos foram validados através da comparação do coeficiente de atrito e do número de Nusselt no tubo achatado com resultados disponíveis na literatura. São apresentados os resultados, associados à transferência de calor, para a variação da temperatura ao longo do tubo, o coeficiente de transferência de calor, o fluxo de calor, o número de Prandtl e o número de Nusselt na gama de condições estudadas, bem como, algumas características associadas aos escoamentos e aos nanofluidos como o coeficiente de atrito, a queda de pressão, a potência dissipada, a massa volúmica, a viscosidade, a condutividade térmica e o calor específico. Os resultados mostram-se promissores no que se refere ao uso de nanofluidos na otimização da transferência de calor para a refrigeração automóvel, uma vez que a presença de nanopartículas de alumina ou de dióxido de titânio no líquido refrigerador garantem um maior arrefecimento quando comparado apenas com o fluido base (água).

**Palavras-Chave:** Transferência de calor convecção forçada, escoamento laminar, nanofluidos, alumina, dióxido de titânio, automóvel.



## Abstract

In this work nanofluids water/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  and water/ $\text{TiO}_2$  were used to study its performance in the convective heat transfer in a flat tube of an automobile radiator. The heat transfer characteristics of nanofluids subject to forced convection were investigated for different concentrations of nanoparticles between 0,25 and 10,0 % of nanofluid and compared with a base fluid (water). The investigation focuses on the comparison of the flow and heat transfer to the cases where water properties are considered independent and dependent of the temperature. Numerical results obtained were validated for water flow by comparing the friction factor and the Nusselt number in the flat tube with accurate results available in the literature. Heat transfer results are presented for temperature, heat transfer coefficient, heat flux, Prandtl number and the averaged Nusselt number in the range of conditions studied as well as flow and nanofluids characteristics like friction factor, pressure loss, dissipated power, density, viscosity, thermal conductivity and specific heat. The results show promise with regard to use of nanofluids for optimization of heat transfer for cooling the motor, since the presence of alumina and titanium oxide nanoparticles provide a greater cooling compared only with the base fluid (water).

**Keywords:** forced convection heat transfer, laminar flow, nanofluids, alumina, titanium oxide, automobile.



# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| Agradecimentos .....  | i         |
| Resumo .....  | iii       |
| Abstract .....  | v         |
| Glossário de símbolos e abreviaturas.....                                 | xiii      |
| Estrutura da Dissertação .....  | xvii      |
| <b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>1</b>  |
| 1. Introdução .....   | 3         |
| 1.1 Motivação .....   | 3         |
| 1.2 Revisão bibliográfica .....   | 4         |
| 1.3 Objetivos .....   | 7         |
| <b>CAPÍTULO II – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>                         | <b>9</b>  |
| 2. Formulação do problema .....   | 11        |
| 2.1 Equações de governo .....   | 11        |
| 2.1.1 escoamento laminar num tubo.....                                    | 12        |
| 2.1.2 Alguns parâmetros característicos do escoamento de nanofluidos..... | 16        |
| 2.1.3 Propriedades termofísicas dos nanofluidos.....                      | 18        |
| 2.2 Geometria.....  | 19        |
| 2.3 Condições de Fronteira .....  | 20        |
| <b>CAPÍTULO III – MÉTODOS NUMÉRICOS.....</b>                              | <b>23</b> |
| 3. Métodos numéricos .....  | 25        |
| 3.1 Simulação numérica.....   | 26        |
| 3.2 Validação do método numérico .....                                    | 29        |
| 3.3 Independência da malha.....   | 31        |
| <b>CAPÍTULO IV – PROPRIEDADES DOS NANOFLUIDOS .....</b>                   | <b>37</b> |

|  |    |
|--|----|
| 4. Propriedades dos nanofluidos .....                              | 39 |
| 4.1 Fluido base (água).....  | 39 |
| 4.1.1 Propriedades independentes da Temperatura.....               | 40 |
| 4.1.2 Propriedades dependentes da Temperatura.....                 | 41 |
| CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....          | 43 |
| 5. Apresentação e discussão dos resultados .....                   | 45 |
| 5.1 Nanofluidos.....   | 45 |
| 5.1.1 Propriedades da água independentes da temperatura.....       | 46 |
| 5.1.2 Propriedades do fluido base dependentes da temperatura ..... | 60 |
| CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....  | 83 |
| 6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros .....             | 85 |
| 6.1 Conclusões .....   | 85 |
| 6.2 Propostas para trabalhos futuros .....                         | 86 |
| Referências bibliográficas.....                                    | 89 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1</b> – Perfil da velocidade do escoamento totalmente desenvolvido num tubo circular.....   | 12 |
| <b>Figura 2.2</b> – Geometria do tubo achatado, usada no presente estudo. ....  | 19 |
| <b>Figura 2.3</b> – Representação geométrica do tubo utilizado. ....  | 20 |
| <b>Figura 3.1</b> – Esquema do procedimento do algoritmo <i>SIMPLE</i> . ....   | 25 |
| <b>Figura 3.2</b> – As quatro malhas estudadas no presente estudo. ....   | 28 |
| <b>Figura 3.3</b> – Desenvolvimento de um escoamento no interior de um tubo circular (adaptado de Çengel e Cimbala, 2006). ....   | 29 |
| <b>Figura 3.4</b> – Geometrias de tubos: i) retângulo; ii) elipse. ....   | 31 |
| <b>Figura 3.5</b> – Comparação do fator de atrito médio, obtidos com as malhas 1, 2, 3 e 4 com os valores teóricos para as geometrias: circular, retangular e elíptica. ....  | 32 |
| <b>Figura 3.6</b> – Comparação do número de Nusselt médio obtido com as malhas 1, 2, 3 e 4 com os valores teóricos para a geometria circular.....   | 33 |
| <b>Figura 3.7</b> – Independência da malha 3 com perfil desenvolvido: fator de atrito.....  | 35 |
| <b>Figura 5.1</b> – Temperatura ao longo do tubo em função da concentração de nanopartículas. a) $Al_2O_3$ para $Re = 250$ e $Re = 2000$ ; b) $TiO_2$ para $Re = 250$ e $Re = 2000$ . ....  | 46 |
| <b>Figura 5.2</b> – Coeficiente de transferência de calor $h$ ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função da concentração: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ ..... | 48 |
| <b>Figura 5.3</b> – Fluxo de calor $q$ ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função da concentração: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ . ....                       | 50 |
| <b>Figura 5.4</b> – Número de Nusselt $Nu$ ao longo do tubo, em função da concentração: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ .....   | 52 |
| <b>Figura 5.5</b> – Coeficiente de atrito $C_f$ ao longo do tubo, em função da concentração de $Al_2O_3$ . a) $Re = 250$ ao longo da linha-1; b) $Re = 250$ ao longo da linha-2; c) $Re = 2000$ ao longo da linha-1; d) $Re = 2000$ ao longo da linha-2.....  | 53 |
| <b>Figura 5.6</b> – Coeficiente de atrito $C_f$ ao longo do tubo, em função da concentração de $TiO_2$ : a) $Re = 250$ ao longo da linha-1; b) $Re = 250$ ao longo da linha-2; c) $Re = 2000$ ao longo da linha-1; d) $Re = 2000$ ao longo da linha-2. ....   | 55 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 5.7</b> – Temperatura ao longo do tubo em função da concentração de nanopartículas, com as propriedades a depender da temperatura. a) $Al_2O_3$ para $Re = 250$ e $Re = 2000$ ; b) $TiO_2$ para $Re = 250$ e $Re = 2000$ .....  | 60 |
| <b>Figura 5.8</b> – Massa volúmica $\rho$ ao longo do tubo, em função das concentrações: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ . .....  | 62 |
| <b>Figura 5.9</b> – Coeficiente de transferência de calor $h$ ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função das concentrações, para o caso em que as propriedades dependem da temperatura: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ . ..... | 64 |
| <b>Figura 5.10</b> – Fluxo de calor $q$ ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função das concentrações, para o caso em que as propriedades dependem da temperatura: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ .....                         | 66 |
| <b>Figura 5.11</b> – Condutividade térmica $k$ ao longo do tubo, em função das concentrações: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ . .....   | 67 |
| <b>Figura 5.12</b> – Calor específico ao longo do tubo, em função das concentrações: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ .....  | 69 |
| <b>Figura 5.13</b> – Viscosidade ao longo do tubo, em função das concentrações: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ .....   | 71 |
| <b>Figura 5.14</b> – Número de Prandtl $Pr$ ao longo do tubo, em função das concentrações: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ . .....  | 73 |
| <b>Figura 5.15</b> – Número de Nusselt $Nu$ ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração: a) $Re = 250$ e $Al_2O_3$ ; b) $Re = 250$ e $TiO_2$ ; c) $Re = 2000$ e $Al_2O_3$ ; d) $Re = 2000$ e $TiO_2$ .....  | 75 |
| <b>Figura 5.16</b> – Coeficiente de atrito $C_f$ ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração de $Al_2O_3$ : a) $Re = 250$ ao longo da linha-1; b) $Re = 250$ ao longo da linha-2; c) $Re = 2000$ ao longo da linha-1; d) $Re = 2000$ ao longo da linha-2. ....  | 77 |
| <b>Figura 5.17</b> – Coeficiente de atrito $C_f$ ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração de $TiO_2$ : a) $Re = 250$ ao longo da linha-  |    |

|   |    |
|---|----|
| 1; b) $Re = 250$ ao longo da linha-2; c) $Re = 2000$ ao longo da linha-1; d) $Re = 2000$ ao longo da linha-2..... | 78 |
|---|----|

## Índice de tabelas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 2.1</b> – Dimensões da geometria do tubo.....   | 20 |
| <b>Tabela 3.1</b> – Características das malhas (malha 1, 2, 3 e 4) estudadas.....   | 28 |
| <b>Tabela 3.2</b> – Erro relativo percentual do fator de atrito simulado em relação aos valores teóricos.....   | 33 |
| <b>Tabela 3.3</b> – Erro médio relativo percentual do número de Nusselt médio simulado em relação ao valor teórico.....   | 34 |
| <b>Tabela 4.1</b> – Propriedades das nanopartículas e do fluido base à temperatura de 303,15 K (30 °C).....   | 40 |
| <b>Tabela 4.2</b> – Propriedades das nanopartículas e do fluido base à temperatura de 363,15 K (90 °C).....   | 41 |
| <b>Tabela 5.1</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $Al_2O_3$ com as propriedades independentes da temperatura e calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada $Re = 250$ ( $v = 0,0429$ m/s)..... | 57 |
| <b>Tabela 5.2</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $Al_2O_3$ com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada $Re = 2000$ ( $v = 0,3434$ m/s).....  | 57 |
| <b>Tabela 5.3</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $TiO_2$ com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada $Re = 250$ ( $v = 0,0429$ m/s).....     | 59 |
| <b>Tabela 5.4</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $TiO_2$ com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada $Re = 2000$ ( $v = 0,3434$ m/s).....    | 59 |
| <b>Tabela 5.5</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $Al_2O_3$ com as propriedades dependentes da  |    |

|  |    |
|--|----|
| temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada $Re = 250$ ( $v = 0,0172$ m/s).....   | 80 |
| <b>Tabela 5.6</b> – Comparação de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $Al_2O_3$ com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada $Re = 2000$ ( $v = 0,1376$ m/s).....                  | 80 |
| <b>Tabela 5.7</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $TiO_2$ com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada $Re = 250$ ( $v = 0,0172$ m/s).....  | 81 |
| <b>Tabela 5.8</b> – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $TiO_2$ com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada $Re = 2000$ ( $v = 0,1376$ m/s)..... | 81 |

## Glossário de símbolos e abreviaturas

### Lista de letras latinas

$A$  – Área da superfície ( $\text{m}^2$ )

$A_t$  – Área da secção transversal ( $\text{m}^2$ )

$C$  – Capacidade térmica (J/K)

$C_f$  – Coeficiente de atrito

$c_p$  – Calor específico a pressão constante (J/kg.K)

$d$  – Diâmetro do tubo (m)

$D_h$  – Diâmetro hidráulico (m)

$f$  – Fator de atrito

$g$  – Aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )

$h$  – Coeficiente de transferência de calor ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ )

$k$  – Condutividade térmica (W/m.K)

$L$  – Distância, equação (2.17) (m)

$L$  – Comprimento do tubo (m)

$L_h$  – Comprimento hidrodinâmico (m)

$L_h$  – Comprimento térmico (m)

$m$  – Massa (kg)

$\dot{m}$  – Caudal mássico (kg/s)

$Nu$  – Número de Nusselt

$Nu_{0-x}$  – Número de Nusselt local

$Nu_L$  – Número de Nusselt, equação (2.28)

$P$  – Perímetro, equação (2.21) (m)

$P$  – Potência requerida para circulação do fluido (W)

$P_0$  – Potência requerida no caso onde só há água (0,0 % de concentração)

$P_{\%}$  – Potência requerida para concentrações de nanopartículas diferentes de 0,0 %

$P_R$  – Potência relativa percentual (%)

$p$  – Pressão total (Pa)

$p_e$  – Pressão estática (Pa)

$\Delta p$  – Queda de pressão (Pa)

$\frac{\Delta p}{L}$  – Queda de pressão por unidade de comprimento (Pa/m)

$Pr$  – Número de Prandtl

$q$  – Fluxo de calor (W/m<sup>2</sup>)

$q_{rad}$  – Calor por radiação (W/m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}$  – Taxa de transferência de calor (W)

$\dot{Q}_c$  – Calor convectivo por unidade de tempo (W)

$r$  – Posição radial medida a partir do centro do tubo (m)

$R$  – Raio da conduta (m)

$Re$  – Número de Reynolds

$T_f$  – Temperatura do fluido (K)

$T_e$  – Temperatura do fluido na entrada do tubo (K)

$T_{ext}$  – Temperatura envolvente, no exterior do tubo (K)

$T_p$  – Temperatura na parede do tubo (K)

$T_s$  – Temperatura do fluido na saída do tubo (K)

$T_a$  – Temperatura da água (K)

$V$  – Volume (m<sup>3</sup>)

$\dot{V}$  – Caudal volúmico (m<sup>3</sup>/s)

$\bar{v}$  – Velocidade média (m/s)

$v_{máx}$  – Velocidade máxima (m/s)

$v_x$  – Velocidade segundo o eixo do  $x$  (m/s)

$v_y$  – Velocidade segundo o eixo do  $y$  (m/s)

$v_z$  – Velocidade segundo o eixo do  $z$  (m/s)

$x$  – Abcissa

$y$  – Ordenada

$z$  – Cota

### **Lista de letras gregas**

$\varphi$  – Concentração de nanopartículas (%)

$\rho$  – Massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  – Viscosidade dinâmica (Pa.s)

$\tau_{rx}$  – Perfil da tensão de corte (Pa)

$\tau_{cp}$  – Tensão de corte na parede (Pa)

### **Subscritos e sobrescritos**

$nf$  – Nanofluido

$fb$  – Fluido base

$ef$  – Efetiva

$np$  – Nanopartículas

## **Lista de abreviações**

3D – Três dimensões

*SIMPLE* – Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

## **Símbolos Químicos**

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Alumina

$\text{TiO}_2$  – Dióxido de titânio

$\text{SiO}_2$  – Dióxido de silício

## **Estrutura da Dissertação**

O trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. O Capítulo I é dedicado a uma breve introdução ao tema dos nanofluidos e ao estado da arte, apresentando a motivação e os objetivos deste estudo.

No Capítulo II é formulado o problema, as equações de governo, envolvendo as equações representativas de um escoamento laminar num tubo, algumas equações características em escoamentos envolvendo nanofluidos, bem como as equações utilizadas nas propriedades termofísicas dos nanofluidos. É ainda apresentada a geometria do problema e as condições de fronteira adotadas neste estudo.

No Capítulo III inicia-se com o método numérico. Referindo-se às etapas de simulação computacional após breve introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional. Também neste capítulo está presente a validação e independência da malha.

O Capítulo IV apresenta as propriedades dos nanofluidos, revelando as equações utilizadas para a mistura do fluido base (água) com as nanopartículas dos materiais investigados (alumina e dióxido de titânio).

No Capítulo V é feita a apresentação e a discussão dos resultados extraídos das simulações computacionais.

Por fim, no Capítulo VI, são retiradas as conclusões deste estudo e feitas algumas recomendações para trabalhos futuros de modo a complementar este estudo e a melhorar o conhecimento na área.



# **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**



# 1 Introdução

Este capítulo descreve os motivos e os objetivos que levaram a cabo este estudo. Com isso, citam-se alguns trabalhos já realizados no mesmo âmbito deste estudo, que se destacaram como apoio na literatura pelo seu contributo nesta área de investigação, tanto para melhorar o conhecimento do efeito dos nanofluidos na transferência de calor, como para o desenvolvimento tecnológico mais eficiente no processo de refrigeração, nomeadamente aplicado na indústria automóvel.

## 1.1 Motivação

Num mundo cada vez mais competitivo a todos os níveis e onde o desenvolvimento da tecnologia tem levado à constante melhoria de processos, hoje em dia é fundamental procurar obter a máxima eficiência em tudo o que é possível. Até porque nos dias de hoje cerca de 70 % da energia que se utiliza é adquirida em processos que envolvem transferência de calor, logo esta necessidade energética é cada vez maior, bem como, a produção de equipamentos gradativamente mais cómodos, onde cada vez mais é levado em conta a sua dimensão e/ou o seu peso, o que requer uma procura constante de processos que permitam aumentar a eficiência energética (Eastman *et al.*, 2004). Os nanofluidos têm sido objeto de estudo nos últimos anos dadas as suas boas características de desempenho térmico, pois apresentam grande potencialidade na otimização dos processos de transferência de calor no setor industrial. Isto porque, até recentemente utilizavam-se fluidos convencionais para a transferência de calor, como a água ou o etilenoglicol, que são do conhecimento geral terem menores capacidades térmicas do que os metais por exemplo, o que os torna pouco atrativos em termos de eficiência energética. É a partir de aqui que surgiu o termo nanofluido, sendo este definido então pela adição de partículas sólidas normalmente inferior a 100 nm, a um fluido base, que normalmente é um dos fluidos convencionais já mencionados anteriormente, que assim permite um aumento na condutividade térmica da suspensão (fluido base + nanopartículas) e conseqüentemente uma melhor capacidade de transferência de calor. Foi em 1995 que Choi e Eastman (1995) misturaram pela primeira vez um nanofluido com nanopartículas sólidas de um metal, surgindo aqui o primeiro contacto com o agora designado “nanofluido”. Podendo este ter várias aplicações nas mais diferentes áreas, como indústria alimentar, militar, solar térmica e fotovoltaica, entre outros, surge então também a área automóvel, com destaque para a

refrigeração. Como se sabe a evolução industrial automóvel tem tido muitos avanços ao longo dos anos, o que leva a que atualmente cada pormenor poder contar para uma melhor otimização das suas funcionalidades. Na otimização de equipamentos que envolvam a transferência de calor, como é o caso do sistema de refrigeração, os nanofluidos aparecem como uma nova oportunidade para melhorar a sua performance. Os recentes avanços tecnológicos, quer da nanotecnologia como da engenharia de refrigeração, são no presente um novo desafio com a procura de materiais capazes de permitirem a construção de sistemas com menores dimensões e maior eficiência nas trocas de calor. Atualmente as nanopartículas mais frequentemente usadas em estudos para a adição ao fluido base, são de três tipos, materiais metálicos (ex: prata), materiais não metálicos (ex: alumina) e os derivados de carbono (ex: nanotubos de carbono). O grande desafio para a utilização de nanofluidos é a sua estabilização nas condições de trabalho, como sedimentação, entupimento ou erosão (Santos, 2015). No que toca à sua aplicação automóvel a principal barreira está na obtenção dos nanofluidos em grande escala, bem como perceber qual o mais adequado para cada situação, dado a não linearidade das situações e a vasta possibilidade dos materiais utilizados nesta área. Assim, é importante perceber que melhorias os nanofluidos podem trazer em termos de transferência de calor, como tal, tem-se vindo a estudar a influência de nanopartículas adicionadas a um fluido base, nas propriedades que podem estar associadas ao escoamento, como o fator de atrito, número de Reynolds ou condutividade térmica.

O presente estudo, pretende simular e ajudar a entender melhor a influência dos parâmetros que podem ser associados ao escoamento, para dois nanofluidos escolhidos (alumina/água e dióxido de titânio/água) na transferência de calor num tubo de refrigeração automóvel, tendo em conta algumas condições operacionais e diferentes concentrações do nanomaterial adicionado.

## **1.2 Revisão bibliográfica**

Nesta secção é apresentada uma revisão dos trabalhos elaborados na área e que serviram de apoio, de modo a entender as condições gerais de escoamento, de refrigeração automóvel e as características dos nanofluidos.

O estudo dos nanofluidos pode ser tratado de duas formas, como fluido de uma fase ou então fluido de duas fases. Tratar como fluido de uma fase consiste em considerar que o nanofluido é composto apenas por um líquido, ou seja, considera as propriedades das

nanopartículas sólidas adicionadas mas, no entanto, depois é considerado que apenas existe uma fase, o conjunto fluido base e as nanopartículas como um elemento só e no estado líquido. No fluido de duas fases, é considerada a separação do fluido base e das nanopartículas sólidas. Contudo, o estudo de nanofluidos de duas fases é um problema um pouco mais complexo, pelo que neste estudo foi então considerado apenas o fluido de uma fase. Kakaç e Pramuanjaroenkij (2016) elaboraram um artigo de revisão, abordando os tratamentos usados em estudos que consideram o nanofluido com uma fase e com duas fases, na transferência de calor por convecção em nanofluidos. Como cada vez é dada uma maior atenção a trabalhos de investigação com nanofluidos, tem-se descoberto cada vez mais possíveis aplicações, com destaque para a indústria automóvel e para sistemas de refrigeração. E de facto, estes autores concluíram que os nanofluidos podem aumentar a condutividade térmica efetiva e os coeficientes de calor convectivos, em relação à utilização de apenas um fluido base. Onde os materiais não metálicos, como a alumina ou o dióxido de titânio, têm particularmente bons resultados de coeficientes de transferência de calor, até mesmo para pequenas concentrações. No entanto na escolha de um nanofluido existem alguns aspetos a ter em conta relativamente às nanopartículas a adicionar, como a dimensão, a forma, a fração adicionada bem como as propriedades termofísicas. Assim, é preciso encontrar relações para algumas das propriedades, como a massa volúmica e o calor específico. Kalaç e Pramuanjaroenkij (2016) apresentam algumas das relações mais utilizadas, tendo em conta a concentração adicionada de nanopartículas. Também a viscosidade é um dos parâmetros mais importantes, pois afeta diretamente a perda de pressão na convecção forçada. A viscosidade depende da fração de partículas, do tamanho, da temperatura e da amplitude de agrupamento das nanopartículas. Eles também identificaram numa investigação experimental com a mistura de alumina e água alguns resultados inesperados, pois em alguns casos resultaram viscosidades dinâmicas demasiadamente altas. Já numa investigação envolvendo o nanofluido com dióxido de titânio, verificaram que a viscosidade relativa aumenta com o aumento da fração de volume da nanopartícula, mas neste caso também verificaram que a viscosidade do nanofluido era independente da temperatura. Também aqui são apresentadas algumas das correlações empíricas para a convecção forçada com nanofluidos, tanto para o número de Nusselt como para o coeficiente de atrito, no entanto, a maioria dessas correlações são para o caso de um tubo circular, o que não é o nosso caso de estudo. Na sua investigação, considerando o escoamento laminar de água/alumina eles notaram que os resultados obtidos para modelos de uma fase e de duas fases, apresentam diferenças muito pequenas entre eles, especialmente quando as propriedades termofísicas são dependentes da temperatura.

Também num estudo sobre o estado da arte da transferência de calor por convecção em nanofluidos, Vanaki *et al.* (2016), falam sobre a importância da evolução de dispositivos térmicos mais compactos, como consequência da procura de melhores eficiências, explicando as principais razões, como a limitação de espaços e poupanças de energia e de materiais. E chegaram a concluir que em alguns estudos com nanofluidos, observou-se que a condutividade térmica aumentou até três vezes mais em relação ao fluido base. No entanto encontraram também um problema, relacionado com a rápida sedimentação. Outra conclusão nesta revisão foi que o aumento da transferência de calor, num estudo envolvendo a alumina, é mais pronunciado quando o fluido base usado é etilenoglicol comparado com a água. Vanaki *et al.* (2016) também afirmaram que muitos estudos confirmam que o coeficiente de transferência de calor em nanofluidos pode ser melhorado em mais de 20 % para concentrações pequenas de nanopartículas, concentrações abaixo de 5 %. São ainda apresentadas várias correlações para a condutividade térmica e a viscosidade, investigadas até meados de 2015, bem como os estudos numéricos sobre nanofluidos de uma fase, tendo em conta o tipo de escoamento, a geometria do tubo, os nanofluidos, e alguns parâmetros como a concentração ou o tamanho das nanopartículas.

Hussein *et al.* (2014a) fizeram um estudo sobre a transferência de calor com convecção forçada num sistema de arrefecimento automóvel. Nesse estudo considerava-se a temperatura na entrada do radiador de 60 a 80 °C e temperatura de saída de 25 °C. Quanto ao nanofluido, foi utilizado SiO<sub>2</sub>, para diferentes concentrações (1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 %) para nanopartículas com um diâmetro de 30 nm, o fluido base utilizado foi a água. O estudo reduz-se ao escoamento num dos tubos constituintes do radiador automóvel como exemplo, tendo 345 mm de comprimento, e uma secção aproximadamente retangular achatada mas com dois dos lados redondos, largura de 9 mm e 3 mm, respetivamente. Foi assumido que o fluido era incompressível e newtoniano, com as propriedades termofísicas do nanofluido constantes, desprezando a espessura do tubo. Após a validação do modelo físico e tendo em conta estas condições de fronteira foram feitas as simulações com o programa *Fluent* e os resultados numéricos foram comparados com os resultados obtidos de uma experiência prática, extraíndo como resultado final a variação do fator de atrito e do número de Nusselt. Daqui foi concluído que o coeficiente de atrito e o número de Nusselt dependem muito da concentração de nanopartículas adicionadas e do número de Reynolds. Também concluíram que o número de Nusselt varia com o número de Reynolds, algo que estava de acordo com as simulações

numéricas. Por fim inferiu-se que o fator de atrito diminui com o aumento da temperatura de entrada.

Uma das principais barreiras relativas à validação das simulações está em encontrar as correlações mais corretas para as propriedades dos nanofluidos, devido aos limites de temperaturas e/ou concentração estudados, entre outros. Vajjha *et al.* (2010) realizaram um estudo numérico, onde utilizaram novas correlações para a viscosidade e para a condutividade térmica de nanofluidos, em função da concentração de nanopartículas e da variação da temperatura. Foi usada a condição de fronteira baseada no coeficiente de transferência de calor e a viscosidade para 90 °C, temperatura essa que é a temperatura estimada no radiador automóvel. Foram, então, utilizadas como condição de fronteira, a temperatura de entrada de 90 °C, na saída a temperatura ambiente de 30 °C para um perfil de escoamento completamente desenvolvido, no entanto para valores altos de números de Reynolds não foi considerado o escoamento completamente desenvolvido. Na fronteira foi considerada a troca de calor dada pela condição fronteira para o coeficiente de transferência de calor  $h = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Foi usado um corte de secção de um tubo achatado, com 500 mm de comprimento, 2,54 mm de altura e 8,09 mm de largura. Foram simulados dois nanofluidos, alumina e dióxido de cobre, para dois fluidos base diferentes água e etilenoglicol. Neste estudo verificaram que o fator de atrito e o número de Nusselt, local e médio, aumentam com o aumento da concentração das nanopartículas. Por outro lado, também verificaram que o aumento da concentração faz aumentar o coeficiente de transferência de calor, bem como, a perda de pressão.

Hussein *et al.* (2014b) fizeram um outro estudo experimental do aumento de transferência de calor num radiador de carro usando nanofluidos, dióxido de titânio e dióxido de silício, com a água como fluido base, utilizando números de Reynolds entre 250 e 1750 e concentrações de 1,0 a 2,5 %. Os autores concluíram que a transferência de calor, o fator de atrito e as perdas de pressão aumentam com o aumento da concentração de nanopartículas.

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho centra-se na investigação numérica, recorrendo ao *software Fluent*, do escoamento e da transferência de calor por convecção forçada no interior de um tubo de um radiador de um automóvel. Para o escoamento foram usados dois nanofluidos, um com nanopartículas de alumina e outro com dióxido de titânio. O fluido base é a água. Foram investigadas, dentro do regime laminar, as seguintes condições de escoamento

com velocidades na entrada do tubo 0,0429 m/s e 0,3434 m/s e as propriedades da água independentes da temperatura. Estas velocidades correspondem aos números de Reynolds 250 e 2000, para a água à temperatura de 30 °C. Num segundo estudo, foram também feitas investigações, para os mesmos números de Reynolds 250 e 2000, mas com as propriedades da água dependentes da temperatura. Neste caso os números de Reynolds 250 e 2000 foram calculados considerando a temperatura do nanofluido na entrada do tubo de 90 °C, o que corresponde a ter as velocidades 0,0172 m/s e 0,1376 m/s. Pretende-se então estudar a eficiência associada à transferência de calor, no interior de um tubo de um radiador de automóvel quando são usados nanofluidos comparativamente a utilizar apenas o fluido base nestas condições.

## **CAPÍTULO II – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**



## 2 Formulação do problema

Neste capítulo é apresentado a formulação do problema em estudo. São apresentadas as equações de governo, o modelo geométrico utilizado e as condições de fronteira consideradas.

### 2.1 Equações de governo

Em primeiro lugar, é essencial descrever as equações de governo associadas a um escoamento 3D de um fluido incompressível e newtoniano em regime estacionário. Essas equações são as equações da continuidade e de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (2.1)$$

As equações de Navier Stokes são as equações da quantidade de movimento-segundo as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ :

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_e}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.2)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_e}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.3)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p_e}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z, \quad (2.4)$$

onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas espaciais,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido,  $p_e$  a pressão estática e  $g$  a aceleração da gravidade. As componentes da velocidade  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$ , nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respetivamente.

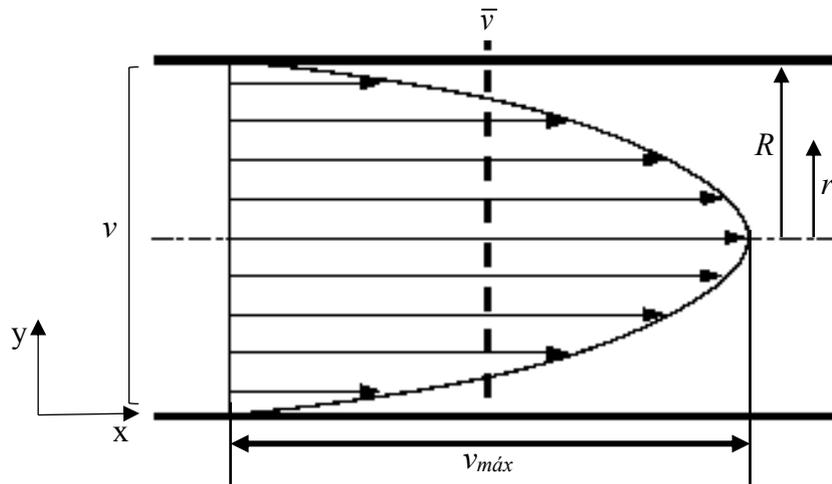
A equação da energia é dada por

$$\rho c_p \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2.5)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante e  $k$  a condutividade térmica.

### 2.1.1 Escoamento laminar num tubo

Para o escoamento laminar numa conduta circular, podemos obter a solução analítica do perfil de velocidade através das equações de Navier-Stokes. Tendo em conta a geometria circular e a simetria do problema (Figura 2.1) as equações são normalmente apresentadas em coordenadas cilíndricas ( *e. g.* Çengel e Cimbala, 2006; Martins, 2011).



**Figura 2.1** – Perfil da velocidade do escoamento totalmente desenvolvido num tubo circular.

Assim, podemos escrever que

$$v_x(r) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (R^2 - r^2), \quad (2.6)$$

onde,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $\frac{dp}{dx}$  é o gradiente de pressão,  $R$  o raio da conduta e  $r$  a posição radial medida a partir do centro do tubo. A velocidade máxima ocorre no centro da conduta, ou seja, quando  $r$  for zero, então a velocidade máxima é obtida por,

$$v_x(0) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} R^2. \quad (2.7)$$

Logo é possível obter o caudal, através de,

$$\dot{V} = \int_A \bar{v} \cdot dA = \int_0^R v_x(r) 2\pi r dr = \int_0^R \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - R^2) 2\pi r dr = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{dp}{dx}. \quad (2.8)$$

Sabendo que,

$$\dot{V} = \bar{v} \pi R^2, \quad (2.9)$$

onde  $\bar{v}$  é a velocidade média, então

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{8\mu\bar{v}}{R^2}. \quad (2.10)$$

Podemos obter a velocidade máxima, substituindo a equação (2.10) na equação (2.7),

$$v_x(0) = 2\bar{v}. \quad (2.11)$$

O perfil de velocidades é obtido relacionando as equações (2.6), (2.10) e (2.11)

$$v_x(r) = 2\bar{v} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]. \quad (2.12)$$

O perfil da tensão de corte é dado, tendo em conta a equação (2.6), por

$$\tau_{rx} = \mu \frac{dv_x}{dr} = \frac{r}{2} \frac{dp}{dx}, \quad (2.13)$$

e a tensão de corte máxima, em valor absoluto, é obtido nas paredes, ou seja, para  $r = R$ , então

$$\tau_{cp} = \tau_{rx}(r = R) = -\frac{R}{2} \frac{dp}{dx}, \quad (2.14)$$

da equação (2.10), podemos obter

$$\tau_{cp} = 4\mu \frac{\bar{v}}{R}, \quad (2.15)$$

tendo em conta a equação (2.14), o coeficiente de atrito nas paredes do tubo, é dado por

$$C_f = \frac{\tau_{cp}}{\frac{1}{2} \rho \bar{v}^2} = -\frac{dp}{dx} \frac{R}{\rho \bar{v}^2}, \quad (2.16)$$

a equação (2.16) dá uma indicação da perda de energia que ocorre nas paredes do tubo devido ao atrito, com a conseqüente queda de pressão no escoamento. Se essa perda, for para uma distância denominada  $L$ , pode-se definir o fator de atrito médio, tendo em conta a equação (2.10) e que  $-\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{L}$ , por

$$C_f = \frac{\Delta p}{L} \frac{R}{\rho \bar{v}^2} = \frac{8\mu}{\rho \bar{v} d} = \frac{16}{Re}, \quad (2.17)$$

sendo  $d$  o diâmetro do tubo é preciso ter em atenção que este  $C_f$  é o coeficiente de atrito de Fanning. Não confundir com o fator de atrito  $f$  de Darcy-Weisbach, ou seja, é quatro vezes maior do que o fator de atrito de Fanning, sendo dado por

$$f = \frac{64}{Re}. \quad (2.18)$$

Contudo o *software* utilizado usa o fator de Fanning  $C_f$ , então é o que teremos em conta para os nossos resultados. O número de Reynolds é dado por,

$$Re = \frac{\rho \bar{v} d}{\mu}. \quad (2.19)$$

Esta demonstração é válida para o tubo circular, no entanto no nosso estudo o tubo não é circular (sendo um misto entre o circular e o retangular). Quando a secção transversal do tubo não é circular, considera-se geralmente uma aproximação ao caso onde a secção é circular, através do diâmetro hidráulico. Então no presente estudo, temos

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D_h}{\mu}, \quad (2.20)$$

onde  $D_h$  é o diâmetro hidráulico do tubo. Notando que este diâmetro hidráulico pode ser obtido, para uma secção transversal não-circular, através de

$$D_h = \frac{4A_t}{P}, \quad (2.21)$$

sendo  $A_t$  a área da secção transversal molhada do tubo e  $P$  o perímetro molhado do tubo.

Por outro lado, de acordo com as leis de Newton do arrefecimento, podemos obter o coeficiente de calor e também o número de Nusselt, através do seguinte procedimento (Hussein *et al.*, 2014a):

$$\dot{Q}_c = hA\Delta T = hA(T_f - T_p), \quad (2.22)$$

onde  $\dot{Q}_c$  é o calor convectivo transferido por unidade de tempo,  $A$  é a área da superfície do tubo,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $T_f$  é a temperatura do fluido e  $T_p$  é a temperatura na parede do tubo.

A taxa de transferência de calor também é dada por,

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(T_e - T_s), \quad (2.23)$$

onde  $\dot{m}$  o caudal mássico,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $T_e$  a temperatura de entrada no tubo e  $T_s$  é a temperatura de saída do tubo. Podendo o caudal mássico ser determinado por,

$$\dot{m} = \rho\bar{v}A = \rho\dot{V}, \quad (2.24)$$

onde  $\dot{V}$  é o caudal volúmico do escoamento.

Combinando as equações (2.22) e (2.23), podemos calcular o coeficiente de transferência de calor dado por,

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_e - T_s)}{A(T_f - T_p)}, \quad (2.25)$$

e o número de Nusselt é dado por,

$$Nu = \frac{hD_h}{k}, \quad (2.26)$$

onde,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico (comprimento característico) e  $k$  é a condutividade térmica do fluido.

### 2.1.2 Alguns parâmetros característicos do escoamento de nanofluidos

Nesta subsecção são apresentadas algumas equações usadas na análise dos resultados.

Quando a condição de fronteira é definida com transferência de calor convectivo e é assumido a espessura zero para a parede do tubo, como o nosso caso, o fluxo de calor é dado por (Çengel e Boles, 2006; Incropera e DeWitt, 1996),

$$q = h(T_{ext} - T_f) + q_{rad}, \quad (2.27)$$

onde  $T_{ext}$  é a temperatura envolvente, no exterior do tubo e  $q_{rad}$  o calor por radiação, que neste caso não foi considerado.

O número de Nusselt, para além de poder ser calculado através da equação (2.26), é também uma medida da relação entre o calor transferido por convecção e o calor transferido por condução,

$$Nu_L = \frac{\text{Transferência de calor por convecção}}{\text{Transferência de calor por condução}}. \quad (2.28)$$

Tal como visto anteriormente, o coeficiente de atrito  $C_f$  é diferente do fator de atrito  $f$  (Shah e London, 1971),

$$f = 4C_f, \quad (2.29)$$

A massa volúmica é dada por

$$\rho = \frac{m_{nf}}{V_{nf}}, \quad (2.30)$$

onde  $m_{nf}$  é a massa do nanofluido e  $V_{nf}$  é o volume ocupado pelo nanofluido.

Também a condutividade térmica  $k_{nf}$ , é um parâmetro interessante para o estudo da transferência de calor. O  $k_{nf}$  tem uma forte ligação ao fluxo de calor, através da lei de condução térmica de Fourier dada por,

$$q = -k_{nf} \frac{\Delta T}{L} \Rightarrow k_{nf} = -\frac{qL}{\Delta T}, \quad (2.31)$$

podendo o  $k_{nf}$  ser definido como a capacidade de um material conduzir calor.

O calor específico  $c_p^{nf}$ , é definido como sendo a energia necessária a fornecer para que o material eleve a sua temperatura em 1 K,

$$c_p^{nf} = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (2.32)$$

onde,  $C$  é a capacidade térmica.

A viscosidade do nanofluido  $\mu_{nf}$  é a capacidade opositora que o nanofluido oferece à tensão de corte, ou seja, é a resistência à fluidez no escoamento. Ela pode ser calculada, relacionando-a com a tensão de corte, conforme as equações (2.13) a (2.15).

O número de Prandtl  $Pr$ , dá a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido, para o nanofluido é dado por

$$Pr = \frac{c_p^{nf} \mu_{nf}}{k_{nf}}. \quad (2.33)$$

É um parâmetro proeminente em transferência de calor. Valores de  $Pr$  pequenos significam que o calor difunde mais facilmente comparado com a velocidade (Santiago, 2011).

A pressão total  $p$ , calculada para fluido incompressível é dada pela soma da pressão estática  $p_e$  com a pressão dinâmica,

$$p = p_e + \frac{1}{2} \rho_{nf} v^2. \quad (2.34)$$

A potência hidráulica teórica requerida para a bomba centrífuga fazer circular o fluido pode ser obtida através (Vajjha *et al.*, 2010),

$$P = p_e Av. \quad (2.35)$$

Com isto, podemos calcular a perda ou ganho de potência relativa, comparando a diferença de potência entre o nanofluido e água ( $P_{\%} - P_0$ ) com a potência quando temos apenas água,

$$P_R = \frac{P_{\%} - P_0}{P_0}, \quad (2.36)$$

onde  $P_0$  é a potência requerida para o caso em que só temos água (concentração 0,0 %) e  $P\%$  a potência requerida quando temos concentrações de nanopartículas diferentes de zero.

### 2.1.3 Propriedades termofísicas dos nanofluidos.

Nesta subsecção são apresentadas as equações que nos permitem relacionar as propriedades do fluido base com as propriedades das nanopartículas associadas aos nanofluidos, tendo por base a concentração adicionada.

Vanaki *et al.* (2016) fizeram uma revisão das investigações feitas até agora sobre os modelos da viscosidade e da condutividade térmica para nanofluidos. Num desses estudos Vajjha *et al* (2009) propôs um modelo para a condutividade térmica efetiva  $k_{ef}$ , que tem em conta o efeito das nanopartículas, o diâmetro, a concentração e a temperatura do nanofluido. No entanto para o nosso caso de estudo e de maneira a não o tornar demasiado complexo apenas se utilizou parte da equação, está relaciona apenas com a concentração, dada por

$$k_{ef} = \left[ \frac{(k_{np} + 2k_{fb}) - 2\varphi(k_{fb} - k_{np})}{(k_{np} + 2k_{fb}) + \varphi(k_{fb} - k_{np})} \right] k_{fb}, \quad (2.37)$$

onde  $k_{np}$  é a condutividade térmica das nanopartículas do material adicionado,  $k_{fb}$  é a condutividade térmica do fluido base utilizado e  $\varphi$  é a concentração de nanopartículas adicionadas. A principal razão desta escolha deve-se ao facto deste modelo ser válido para a gama de temperaturas de 298 K até 363 K, abrangendo assim para o nosso estudo a temperatura máxima definida na temperatura de fronteira (363 K).

Vanaki *et al.* (2016) também apresentaram alguns modelos para a viscosidade dinâmica efetiva  $\mu_{ef}$ . Um desses modelos foi elaborado por Pak e Cho (1998), dado por

$$\mu_{ef} = \mu_{fb} \left( 1 + 39,11\varphi + 533,9\varphi^2 \right), \quad (2.38)$$

onde  $\mu_{fb}$  é a viscosidade do fluido base. A escolha deste modelo deve-se ao facto de ter sido desenvolvido especificamente para os mesmos nanofluidos utilizados no presente estudo, água/alumina e água/dióxido de titânio.

Para a massa volúmica efetiva  $\rho_{ef}$  e para o calor específico efetivo  $c_p^{ef}$ , foram usados os seguintes modelos (Vanaki *et al.*, 2016),

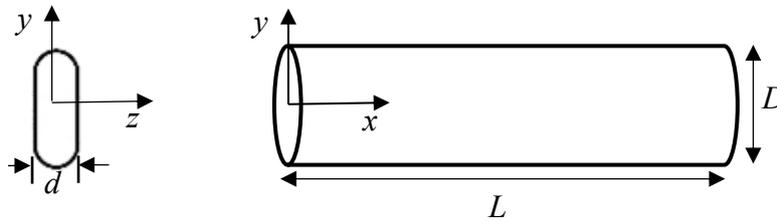
$$\rho_{ef} = (1 - \varphi)\rho_{fb} + \varphi\rho_{np}, \quad (2.39)$$

$$c_p^{ef} = \frac{(1 - \varphi)(\rho_{fb} \times c_p^{fb}) + \varphi(\rho_{np} \times c_p^{np})}{\rho_{ef}}, \quad (2.40)$$

onde  $\rho_{fb}$  é a massa volúmica do fluido base,  $\rho_{np}$  a massa volúmica das nanopartículas do material adicionado,  $c_p^{fb}$  o calor específico do fluido base e  $c_p^{np}$  o calor específico das nanopartículas adicionadas. Como se pode observar estão os dois relacionados e note-se que são assumidos seguirem uma função linear da concentração, uma vez que há falta de dados experimentais sobre a sua dependência da temperatura.

## 2.2 Geometria

A geometria do tubo foi baseada no trabalho de Hussein *et al.* (2014b) uma vez que já foram feitos alguns estudos para a refrigeração automóvel tendo esta geometria como base.



**Figura 2.2** – Geometria do tubo achatado, usada no presente estudo.

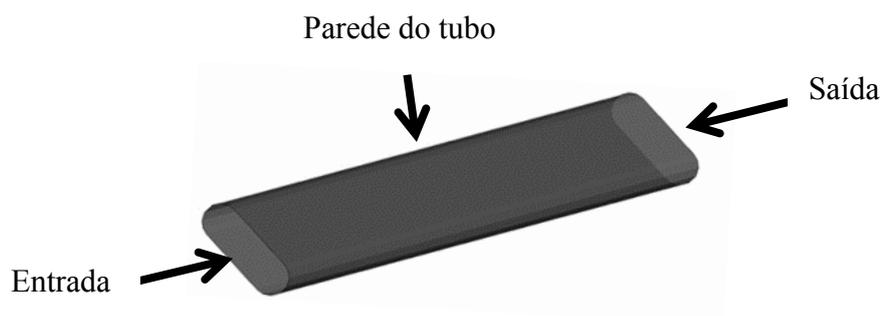
Como podemos ver na Figura 2.2, a geometria criada é um tubo, com um misto de forma retangular com uma forma redonda em duas das paredes, onde  $D$  é o diâmetro maior,  $d$  é o diâmetro menor e  $L$  é o comprimento do tubo, estando as suas dimensões especificadas na Tabela 2.1. Também foi estimado por Hussein *et al.* (2014a) o diâmetro hidráulico  $D_h$ .

**Tabela 2.1** – Dimensões da geometria do tubo.

| <b>Medida</b> | <b>Valor (mm)</b> |
|---------------|-------------------|
| $D$           | 9,0               |
| $d$           | 3,0               |
| $D_h$         | 4,68              |
| $L$           | 345,0             |

### 2.3 Condições de Fronteira

Para além das equações de governo e as propriedades associadas ao fluido base e às nanopartículas de alumina e dióxido de titânio, existem outras condições a ter em conta. Desde já a concentração das nanopartículas a adicionar, que nesta dissertação consideraram-se até 10,0 % da concentração do nanofluido. O nanofluido foi considerado incompressível e em regime estacionário, sendo feito dois tipos de estudo, um com as propriedades do nanofluido independentes da temperatura e outro com as propriedades dependentes da temperatura, sendo que para cada um destes ainda foram consideradas duas condições de entrada diferentes baseado no caudal do escoamento (velocidades diferentes). Contudo, nas paredes do tubo e na saída, as condições consideradas são iguais em todos os casos estudados.

**Figura 2.3** - Representação geométrica do tubo utilizado.

### **Entrada**

Na entrada, para o caso das propriedades independentes da temperatura foi considerada a condição de velocidade constante igual a 0,0429 m/s e 0,3434 m/s. Para o caso das propriedades dependentes da temperatura foi considerada a condição da velocidade constante igual a 0,0172 m/s e 0,1376 m/s. A escolha destas velocidades foi baseada no número de Reynolds, equação (2.20), de modo a termos  $Re = 250$  e  $Re = 2000$  na entrada do tubo, para a água à temperatura igual a 303,15 K e a 363,15 K, para os casos das propriedades independentes e dependentes da temperatura, respetivamente.

Assim, este estudo foi dividido em duas partes, uma parte realizada com uma velocidade associada a um número de Reynolds 250 e outra velocidade para um número de Reynolds 2000 (para ambos os casos, com as propriedades dependentes e independentes da temperatura).

### **Paredes do tubo**

Na parede do tubo foi definida a opção de condição normal de não deslizamento, ou seja, a velocidade do nanofluido junto das paredes é considerado nula. Em termos térmicos foi utilizada a condição da temperatura constante, com a temperatura nas paredes à temperatura do exterior 303,15 K, uma vez que não se considerou a espessura do tubo.

### **Saída**

Na saída foi escolhida a condição de pressão *pressure-outlet*, o que no presente estudo corresponde impor a pressão igual à pressão atmosférica. Todas as outras quantidades são extrapoladas a partir do interior do tubo.



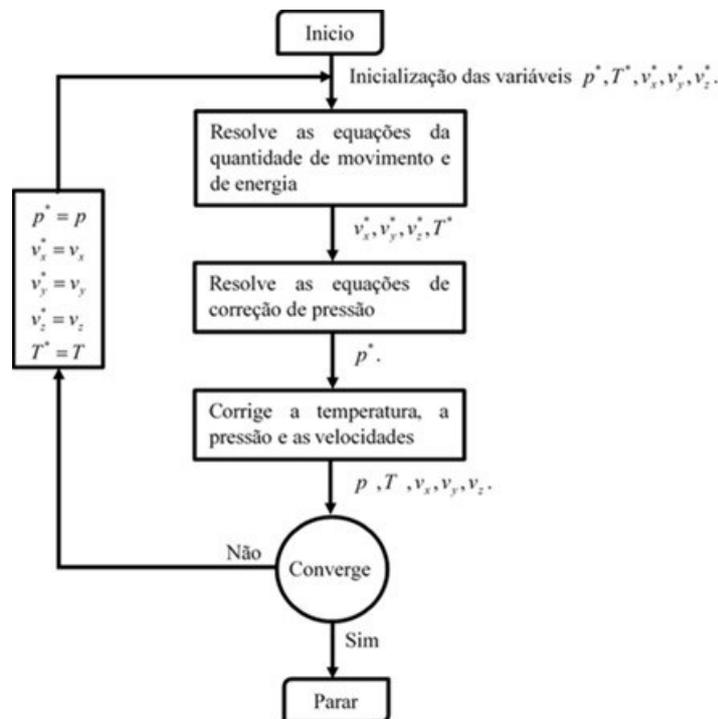
## **CAPÍTULO III – MÉTODOS NUMÉRICOS**



### 3 Métodos numéricos

Tratando-se de um estudo de simulação computacional, foi utilizado um *software* que permitisse investigar o presente caso.

Assim, para o nosso estudo escolhemos o *Fluent* por ser um programa usado frequentemente neste tipo de problemas (e.g., Sousa *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2014, Soares *et al.*, 2011). Este *software* resolve numericamente as equações da energia, de conservação de massa e de quantidade de movimento utilizando o método dos volumes finitos, método esse que consiste em resolver as equações governativas nos volumes de controlo que constituem a malha computacional, dando lugar a um sistema de equações algébricas para as variáveis discretas dependentes. Os campos da pressão e da velocidade são encontrados iterativamente até que o critério de convergência pré estabelecido seja atingido. Na discretização deste sistema de equações foi utilizado o método *Upwind* de segunda ordem para termos convectivos, o esquema *Standard* para a interpolação da pressão e o método de diferenciação central de segunda ordem no que toca aos termos difusivos. Tendo em conta que o fluido é incompressível, para o acoplamento da velocidade e da pressão foi utilizado o algoritmo *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), que é um método semi-implícito. De modo sucinto, na Figura 3.1 é apresentado o algoritmo *SIMPLE*.



**Figura 3.1** - Esquema do procedimento do algoritmo *SIMPLE*.

O procedimento na Figura 3.1, em geral demonstra cinco passos (Patankar, 1980; Martins, 2014):

- 1) Para a primeira iteração, os valores iniciais para a pressão  $p^*$ , para a temperatura  $T^*$  e para as velocidades  $v_x^*$ ,  $v_y^*$  e  $v_z^*$  são inseridos, nas próximas iterações são tomados os valores das iterações anteriores, isto é,  $p^* = p^{n-1}$ ,  $T^* = T^{n-1}$  e  $v_m^* = v_m^{n-1}$ , onde  $m$  é cada componente da velocidade ( $m = x, y, z$ );
- 2) O próximo passo é determinar a cada iteração os novos valores da temperatura  $T^*$  e das velocidades  $v_x^*$ ,  $v_y^*$  e  $v_z^*$ , através da resolução da equação da energia e das equações da quantidade de movimento;
- 3) Segue-se a determinação das pressões  $p^*$  através da equação de correção de pressões.
- 4) Após as correções das temperaturas, velocidades e das pressões são utilizados parâmetros de sub-relaxação, isto permite que as equações conservem a massa, a quantidade de movimento e a energia dentro dos limites residuais.
- 5) Ao obter a convergência para os resíduos pré definidos o processo de iteração é interrompido, atingindo a solução pretendida. Se não se der a convergência ao fim do quarto processo, são atribuídos os novos valores da temperatura, das pressões e das velocidades, reiniciando-se todo o procedimento, com partida em 1).

Para o caso em estudo, foi pré definido o critério de convergência de  $10^{-8}$  para todos os resíduos das equações da continuidade, quantidade de movimento e da energia.

### 3.1 Simulação numérica

O processo de simulação resume-se basicamente em quatro etapas, a criação da geometria, definição da malha, caracterização da física do problema e os resultados.

#### Geometria

A geometria do tubo do radiador foi baseada no estudo de Hussein *et al.* (2014b), ver Figura 2.2.

## Malha

Criada a geometria, a próxima etapa passa pela definição da malha. Na construção da malha é preciso ter em conta alguns parâmetros. A qualidade da malha pode ser avaliada tendo em conta três parâmetros: taxa de convergência, precisão da solução e tempo de processamento (Pássaro, 2015). Quanto maior a taxa de convergência melhor a qualidade da malha e mais rápido se encontra a solução. Malhas de baixa qualidade podem deixar passar alguns aspetos importantes que podem influenciar os resultados. A qualidade das malhas garante soluções mais precisas, mas para garantir a qualidade por vezes é necessário fazer refinamentos das malhas em locais onde as variáveis sofrem variações mais acentuadas, como por exemplo, junto à parede curva no nosso caso (Figura 2.2). Outro aspeto importante é o tempo de processamento, isto é, normalmente quanto mais refinada melhor seria de esperar a precisão de solução no entanto se a malha for demasiado pesada ao ponto das simulações despenderem demasiado tempo sem que os resultados melhorem de forma a ter impacto na solução final em comparação com outras malhas mais leves e mais rápidas de processamento, não se tira daí nenhuma vantagem. Contudo deve-se ter presente que os fatores enunciados não são os únicos fatores determinativos para classificar uma malha como sendo de boa qualidade.

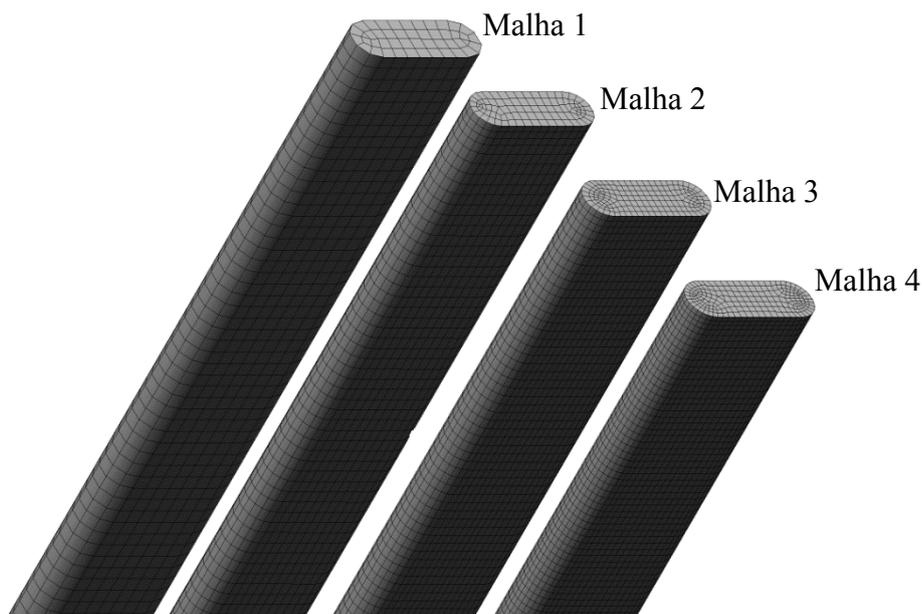
De modo a atingir estes objetivos foram testadas várias malhas, utilizando os diferentes comandos de programa *meshing*, variando o número de elementos e nós, fazendo refinamentos nas áreas mais precisas (como nas curvaturas) e tendo em conta também características associadas à métrica das malhas, como *Element Quality*, *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Orthogonal Quality*. Estas quatro características estão relacionadas com a métrica da malha tendo em conta a dimensão e a complexidade da geometria. Estes parâmetros são indicadores de que a malha à partida apresenta boa qualidade em termos da sua adaptação à geometria do problema. De modo sucinto, o *Element Quality* está associado à qualidade do elemento e varia de 0 a 1 onde 1 representa a melhor qualidade possível. O *Aspect Ratio* tem a ver com a proporção dos elementos, isto é, a relação do lado mais longo com o lado mais curto, podendo o melhor valor associado ser 1 e não tendo um limite específico máximo mas deve ser evitado valores a partir de 40. O *Skewness* é a distorção do elemento em relação à forma ideal tendo em conta a geometria, esse valor varia entre 0 e 1, com 0 a ser o valor excelente e 1 o inaceitável, considerando valores até 0,50 bastante bons, até 0,80 bons e até 0,95 ainda aceitáveis. O *Orthogonal Quality* analisa a qualidade das faces que constituem a geometria dos elementos, este também varia de 0 a 1, no entanto o valor de excelência neste caso é o 1 (Pássaro, 2015).

Tendo em conta os parâmetros mencionados foram definidas quatro malhas finais, com as seguintes especificações apresentadas na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1** – Características das malhas (malha 1, 2, 3 e 4) estudadas.

| <b>Característica\Malha</b> | <b>Malha 1</b> | <b>Malha 2</b> | <b>Malha 3</b> | <b>Malha 4</b> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Elementos                   | 17066          | 38220          | 92598          | 141900         |
| Nós                         | 21576          | 46138          | 104949         | 159962         |
| <i>Element Quality</i>      | 0,93           | 0,73           | 0,72           | 0,79           |
| <i>Aspect Ratio</i>         | 1,5            | 2,33           | 2,21           | 2,04           |
| <i>Skewness</i>             | 0,15           | 0,18           | 0,14           | 0,17           |
| <i>Orthogonal Quality</i>   | 0,97           | 0,97           | 0,97           | 0,97           |

Como podemos ver na Tabela 3.1, as malhas finais revelaram-se boas em termos da métrica. No entanto não esquecer que existem outros parâmetros a ter em conta, como os fatores de qualidade da malha já descritos, entre outros que podem até depender do problema específico em estudo.



**Figura 3.2** - As quatro malhas estudadas no presente estudo.

### Caracterização da física do problema

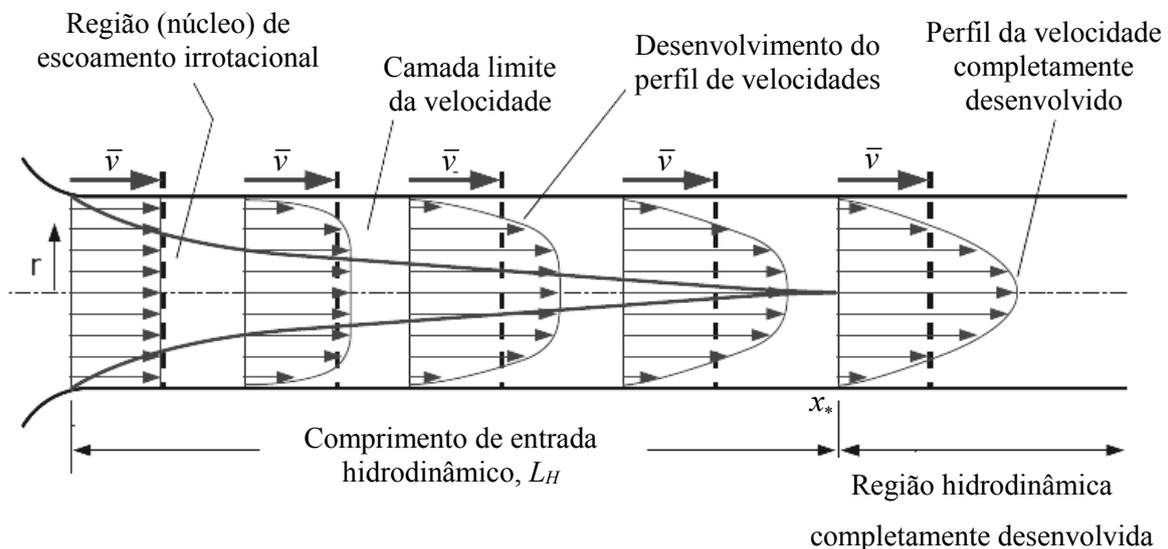
A etapa de caracterização da física do problema (*setup*) é onde é configurado o pré-processamento, ou seja, onde são definidos os dados como as propriedades do fluido ou nanofluido, o critério de convergência e as condições de fronteira. Aqui também se encontra os valores de referência com o qual são comparados os resultados, neste estudo foram considerados sempre os valores de entrada como valores de referência.

### Resultados

Por fim, com todos os processos definidos e após o programa correr a simulação e ter chegado a uma solução, é possível analisar os resultados obtidos. Para esse efeito podem ser usadas várias ferramentas do *Fluent* ou então exportar os dados dos resultados para outros programas para posterior análise.

### 3.2 Validação do método numérico

Na Figura 3.3 podemos ver esquematicamente como se desenvolve o fluido ao longo de um tubo circular.



**Figura 3.3** – Desenvolvimento de um escoamento no interior de um tubo circular (adaptado de Çengel e Cimbala, 2006).

Como se observa na Figura 3.3, é ao longo das paredes do tubo que a camada limite se desenvolve. Ao fim de determinado percurso o perfil do escoamento torna-se completamente

desenvolvido, o ponto onde isto acontece é o ponto  $x_*$ , e é a partir deste que o perfil fica totalmente desenvolvido, com a velocidade máxima no centro do tubo circular, por sua vez a velocidade junto às paredes é reduzida em relação ao perfil ainda por desenvolver, isto deve-se à superfície do tubo exercer uma força de corte o que leva ao retardamento do escoamento. Após atingir o perfil desenvolvido, este já não se altera mais com o escoamento. O comprimento do tubo desde a entrada até ao ponto  $x_*$  é denominado comprimento de entrada hidrodinâmico (e.g. Martins, 2010; Fox *et al.*, 2001; Frass, 1989; Bejan, 1995). Este comprimento pode ser estimado dependendo da geometria entre outros aspetos, para o caso mais similar ao presente estudo, um tubo achatado, tal como Vajjha *et al.* (2010) usamos o comprimento hidrodinâmico dado por,

$$L_H = 0,05 Re_{D_h} D_h . \quad (3.1)$$

O mesmo acontecendo com a temperatura, uma vez que o arrefecimento é maior junto às paredes do tubo pois está em contacto com a zona onde ocorre a transferência de calor, registando-se assim as temperaturas máximas no centro do tubo. O comprimento percorrido pelo fluido até se obter o perfil térmico completamente desenvolvido em tubos circulares é dado por

$$L_T = 0,05 Re_{D_h} Pr D_h , \quad (3.2)$$

onde  $Pr$  é o número de Prandtl, sendo este obtido por,

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} . \quad (3.3)$$

Recorrendo uma vez mais à aproximação com o caso de um tubo circular, o número de Nusselt local para escoamentos laminares com perfil desenvolvido e parede isotérmica como condição de fronteira é dado por (Bejan, 1993)

$$Nu_{0-x} = \begin{cases} 1,615x_*^{-1/3} - 0,70 & x_* \leq 0,005 \\ 1,615x_*^{-1/3} - 0,20 & 0,005 < x_* < 0,03 \\ 3,657 + 0.0499/x_* & x_* \geq 0,03 \end{cases} \quad (3.4)$$

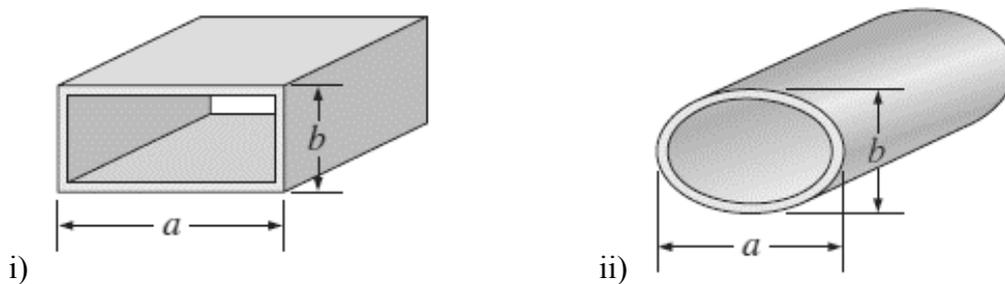
onde,

$$x_* = \frac{x}{Re Pr D_h} , \quad (3.5)$$

onde  $x$  é a posição ao longo do tubo.

### 3.3 Independência da malha

De forma a validar a malha, foi feito o estudo da independência dos resultados comparando o fator de atrito e o número de Nusselt das malhas anteriormente descritas (Tabela 3.1) com equações teóricas obtidas para algumas geometrias, Figura 3.4. Para as geometrias retangular e a elíptica, Çengel e Cimbala (2006), apresentaram um resumo de relações teóricas tendo em conta a relação entre os lados ( $a/b$ ), como podemos ver na Figura 3.4.



**Figura 3.4** - Geometrias de tubos: i) retângulo; ii) elipse.

Para a geometria usada nesta tese ( $a = 9,0$  mm e  $b = 3,0$  mm), temos a relação  $a/b = 3$  à qual está associado o fator de atrito teórico, para a geometria retangular, dado por,

$$f_{\text{retângulo}} = \frac{68,36}{Re}, \quad (3.6)$$

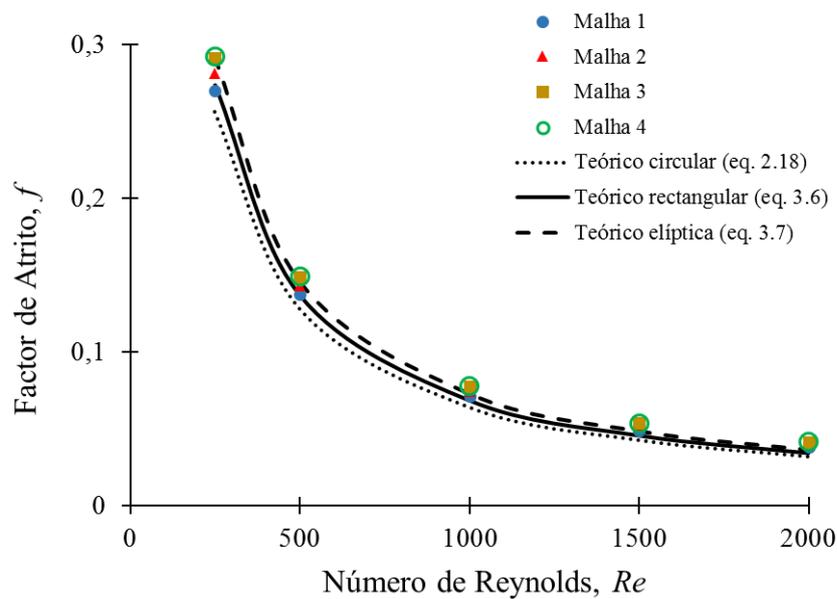
para a mesma relação  $a/b$  mas para a geometria elíptica o fator de atrito teórico é dado por

$$f_{\text{elipse}} = \frac{72,92}{Re}. \quad (3.7)$$

Uma vez que não existem relações teóricas para o nosso tipo de geometria na literatura, foi comparado o fator de atrito com algumas das relações dadas para outras geometrias, nomeadamente a circular, a retangular e a elíptica. Assim, os valores do fator de atrito obtidos com as malhas estudadas (malha 1, 2, 3 e 4) para um perfil de escoamento não desenvolvido e

com velocidade constante na entrada do tubo, são comparados com os valores teóricos para as geometrias do tubo circular, retangular e elíptico.

A equação teórica para a geometria circular é a equação de Darcy-Weisbach dada pela equação (2.18). Na Figura 3.5, nota-se que os valores obtidos para as nossas malhas se afastam um pouco mais da geometria circular do que da retangular e da elíptica, o que parece aceitável analisando a nossa geometria (Figura 2.2) que deverá estar entre a geometria retangular e a geometria elíptica.



**Figura 3.5** - Comparação do fator de atrito médio, obtidos com as malhas 1, 2, 3 e 4 com os valores teóricos para as geometrias: circular, retangular e elíptica.

Foi calculado o erro relativo percentual de cada malha em relação à equação teórica de cada geometria, onde o erro é dado por

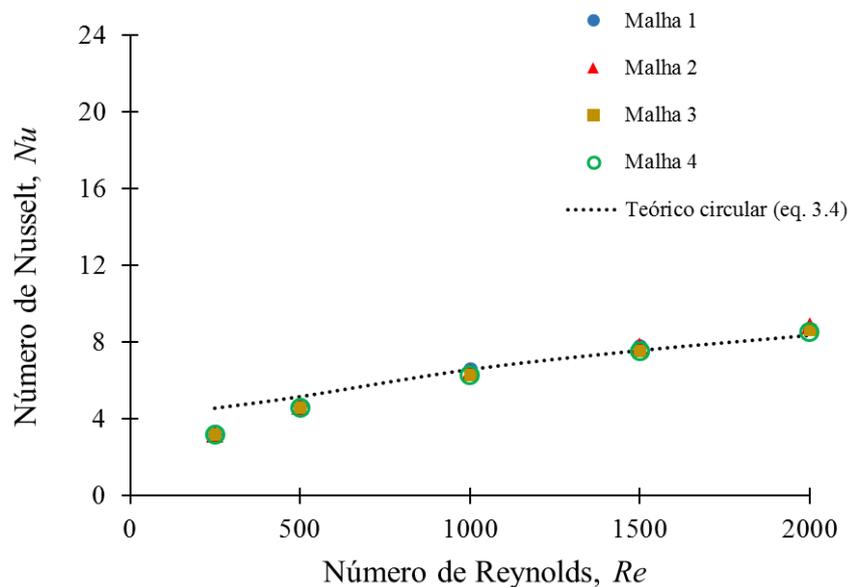
$$erro = \frac{|valor_{teórico} - valor_{simulado}|}{valor_{teórico}} \times 100 . \tag{3.8}$$

A Tabela 3.2 resume os erros de cada malha em relação aos valores teóricos para cada geometria, sendo o erro apresentado a média de todos erros dados para os números de Reynolds estudados (250 e 2000).

**Tabela 3.2** – Erro relativo percentual do fator de atrito simulado em relação aos valores teóricos.

| <b>Média do erro relativo</b> | Geometria circular (equação (2.18)) | Geometria retangular (equação (3.6)) | Geometria elíptica (equação (3.7)) |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Malha 1                       | 11,5 %                              | 4,9 %                                | 4,0 %                              |
| Malha 2                       | 16,6 %                              | 9,1 %                                | 4,5 %                              |
| Malha 3                       | 21,1 %                              | 13,3 %                               | 6,3 %                              |
| Malha 4                       | 21,3 %                              | 13,6 %                               | 6,5 %                              |

Também o número de Nusselt foi simulado para cada malha, para os mesmos números de Reynolds, com o perfil não desenvolvido.

**Figura 3.6** - Comparação do número de Nusselt médio obtido com as malhas 1, 2, 3 e 4 com os valores teóricos para a geometria circular.

Podemos ver pela Figura 3.6 que o número de Nusselt simulado está muito próximo entre todas as malhas, estando também próximo da equação teórica dada para a geometria circular.

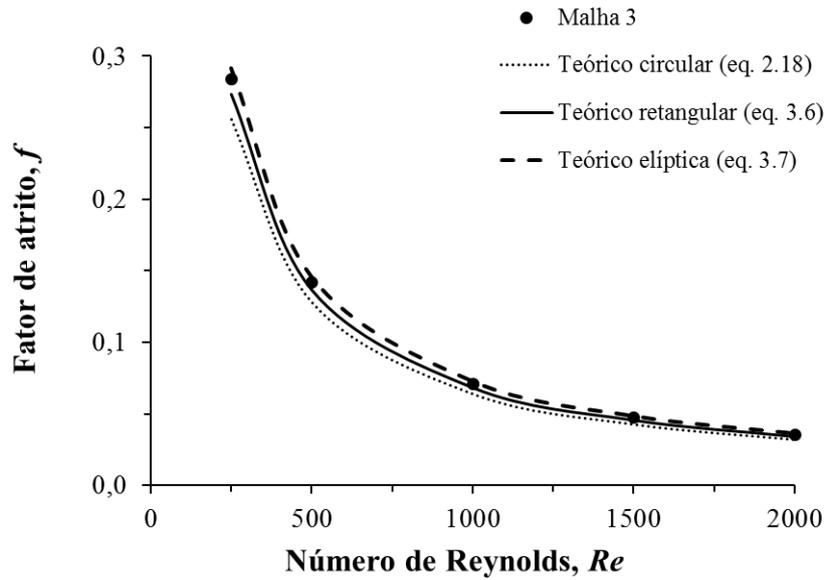
Comparados os valores dados para cada malha com os valores teóricos do número de Nusselt para a geometria circular, dados pela equação (3.4), a Tabela 3.3 apresenta o erro médio para cada malha em relação ao teórico.

**Tabela 3.3** - Erro médio relativo percentual do número de Nusselt médio simulado em relação ao valor teórico.

| <b>Média do erro relativo</b> | <b>Geometria circular (equação (3.4))</b> |
|-------------------------------|---|
| Malha 1                       | 9,4 %                                     |
| Malha 2                       | 10,1 %                                    |
| Malha 3                       | 9,7 %                                     |
| Malha 4                       | 9,8 %                                     |

Após a análise das Tabelas 3.2 e 3.3, podemos concluir que qualquer malha poderia ter sido escolhida, com erros entre  $\sim 4$  a  $6$  % no fator de atrito em relação à geometria elíptica, que parece ser a geometria mais próxima do nosso caso em estudo. E com erros entre  $9$  a  $10$  % no número de Nusselt em relação ao teórico para a geometria. Tendo em conta que nestes erros está também presente o erro do facto da nossa geometria não ser nem elíptica nem circular bem como o perfil de escoamento não ser completamente desenvolvido. Com isto, teve-se que escolher entre uma delas, para tal seguimos os fatores de qualidade da malha anteriormente descritos. E tendo em conta o fator de precisão da solução, eliminamos a malha 1 e a malha 2, por ser pouco refinada nas curvaturas do tubo (Figura 3.2) o que pode levar a uma menor precisão nesta área, podendo deixar escapar fenómenos relevantes ao escoamento. Com isto, escolhendo entre a malha 3 e a 4, tendo presente o fator de processamento de solução, foi verificado após as simulações que a malha 4 demora mais tempo e não alcançando melhores resultados ou relevantes em relação à malha 3, assim foi escolhida a malha 3.

De forma a reforçar a validação da malha 3, foram ainda feitas simulações agora com o perfil completamente desenvolvido da velocidade, dado o comprimento de entrada hidrodinâmico pela equação (3.1)., estando os resultados para este caso na Figura 3.7.



**Figura 3.7** - Independência da malha 3 com perfil desenvolvido: fator de atrito.

Os resultados da malha 3 com o perfil completamente desenvolvido, situam-se entre os teóricos dados para a geometria retangular e a geometria elíptica, o que parece coerente tendo em conta a nossa geometria. Com o erro relativo percentual entre o valor simulado e os teóricos de  $\sim 11\%$  para a geometria circular,  $\sim 4\%$  para a geometria retangular e  $\sim 2\%$  para a geometria elíptica. Com isto considera-se que com a malha 3 os resultados obtidos são independentes da resolução da malha, para malhas mais refinadas do que a malha 3.

Os resultados apresentados daqui para a frente foram obtidos com a malha 3.



**CAPÍTULO IV – PROPIEDADES DOS  
NANOFLUIDOS**



## 4 Propriedades dos nanofluidos

Neste capítulo são apresentadas as propriedades dos nanofluidos, envolvendo as nanopartículas dos materiais, alumina e dióxido de titânio, bem como as propriedades do fluido base, a água.

### 4.1 Fluido base (água)

Neste estudo houve duas abordagens diferentes, uma tratando as propriedades do fluido base, água, como estando sempre a uma temperatura constante, ou seja, não dependem da variação da temperatura a que o fluido fica sujeito. Noutra abordagem realizou-se o estudo de modo a incorporar os efeitos da variação da temperatura nas propriedades da água, com o intuito de tentar obter resultados mais realistas e comparar com a situação anterior. Para esse efeito programou-se um código elaborado em *Visual Basic* representado pelas equações (4.1) a (4.4) dadas por Pramuditya (2011). Estas equações foram introduzidas no programa de simulação *Fluent*, através das funções definidas pelo utilizador em linguagem C. Assim, no decorrer das simulações as propriedades dos nanofluidos vão sendo atualizadas tendo em conta as condições de fronteira definidas, que influenciam a temperatura do nanofluido. Ao contrário deste último, em que bastou apenas carregar o código definido pelo utilizador para fazer as simulações dependentes da temperatura, para o caso das propriedades independentes da temperatura foram previamente calculadas as propriedades da água à temperatura de 303,15 K por ser a temperatura ambiente média considerada neste estudo, bastando assim substituir a temperatura da água  $T_a$  pelo valor 303,15 K nas seguintes equações:

$$\rho_{fb}(\text{kg/m}^3) = 1001,1 - 0,0867 \times (T_a - 273,15) - 0,0035 \times (T_a - 273,15)^2, \quad (4.1)$$

$$\mu_{fb}(\text{Pa.s}) = 1,684 \times 10^{-3} - 4,264 \times 10^{-5} \times (T_a - 273,15) + 5,062 \times 10^{-7} \times (T_a - 273,15)^2 - 2,244 \times 10^{-9} \times (T_a - 273,15)^3, \quad (4.2)$$

$$k_{fb}(\text{W/m.K}) = 0,5636 + 1,946 \times 10^{-3} \times (T_a - 273,15) - 8,151 \times 10^{-6} \times (T_a - 273,15)^2, \quad (4.3)$$

$$c_{pfb}(\text{J/kg.K}) = 4214 - 2,286 \times (T_a - 273,15) + 4,991 \times 10^{-2} \times (T_a - 273,15)^2 - 4,519 \times 10^{-4} \times (T_a - 273,15)^3 + 1,857 \times 10^{-6} \times (T_a - 273,15)^4. \quad (4.4)$$

As equações acima foram obtidas das equações apresentadas por Pramuditya (2011) de modo a incorporarem a temperatura em Kelvin. A principal vantagem em utilizar estas equações deve-se à sua validade nas gamas de temperatura desde 278,15 K até 368,15 K, de interesse para esta investigação uma vez que a temperatura típica nos radiadores é cerca de 363,15 K (90 °C).

#### 4.1.1 Propriedades independentes da Temperatura

Na Tabela 4.1 estão representados os valores obtidos, para as propriedades da água, após a substituição nas equações (4.1) a (4.4) de  $T_a$  pela temperatura 303,15 K. Valores esses que são essenciais para definir as condições de fronteira na entrada, tal como referido no Capítulo 2. Também na Tabela 4.1, podem ser consultadas as propriedades características dos materiais que foram adicionadas ao fluido base, neste caso nanopartículas de alumina ( $Al_2O_3$ ) e nanopartículas de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ), retiradas de Sharma *et al.* (2012).

**Tabela 4.1** – Propriedades das nanopartículas e do fluido base à temperatura de 303,15 K (30 °C).

| Material/Propriedade | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg.°C) | $k$<br>(W/m.°C) | $\mu$<br>(Pa.s) |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Água                 | 995,349                        | 4179,642           | 0,6146          | 0,00079979      |
| $Al_2O_3$            | 3880                           | 773                | 36              | -               |
| $TiO_2$              | 4175                           | 692                | 8,4             | -               |

Para uma dada concentração, estas propriedades são mantidas constantes, no entanto deve-se ter presente que as propriedades dos nanofluidos são alteradas pela adição das concentrações de nanopartículas entre 0,25 e 10 %, de alumina ou de dióxido de titânio. Como tal com base nesta tabela, foram ainda relacionadas as equações (2.37) a (2.40) com as equações (4.1) a (4.4) de modo a elaborar o código em linguagem C, para determinar as propriedades dos nanofluidos em função da temperatura.

### 4.1.2 Propriedades dependentes da Temperatura

No caso das propriedades dependentes da temperatura teve-se em conta a variação da temperatura do fluido base. Neste caso foi considerada a temperatura da água na entrada de 363,15 K (90 °C), logo as condições definidas na entrada foram diferentes em relação às propriedades independentes da temperatura. Substituindo  $T_a$  por 363,15 K nas equações (4.1) a (4.4), as propriedades obtidas e utilizadas para definir as condições de fronteira na entrada do tubo, para este caso, são apresentadas na Tabela 4.2. Tendo em conta que apenas as propriedades do fluido base se alteraram para este caso, as propriedades das nanopartículas adicionadas continuam a ser as mesmas do caso em que as propriedades são independentes da temperatura.

**Tabela 4.2** – Propriedades das nanopartículas e do fluido base à temperatura de 363,15 K (90 °C).

| <b>Material/Propriedade</b>    | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg.°C) | $k$<br>(W/m.°C) | $\mu$<br>(Pa.s) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Água                           | 964,947                        | 4204,934           | 0,6727          | 0,000311        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3880                           | 773                | 36              | -               |
| TiO <sub>2</sub>               | 4175                           | 692                | 8,4             | -               |

Neste caso as propriedades efetivas dos nanofluidos, equações (2.37) a (2.40), são influenciadas pelas variações de temperatura ao longo do escoamento através das equações (4.1) a (4.4). Por sua vez, as propriedades efetivas dos nanofluidos, estão relacionadas a transferência de calor entre o nanofluido e a parede do tubo.



**CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO  
DOS RESULTADOS**



## 5 Apresentação e discussão dos resultados

Cada vez mais procura-se melhorar o desempenho e eficiência de processos que aumentem a eficiência dos automóveis, nomeadamente no que toca à refrigeração mais rápida e eficiente dos motores. Neste âmbito, surgem os nanofluidos, que têm sido nos últimos anos objeto de estudo, dado o seu potencial relativo à transferência de calor. Uma vez que estes são constituídos por um fluido base, fluido esse que pode ser água ou então outro produto desenvolvido a partir da água, comumente utilizado nos refrigeradores, a este fluido base são adicionadas pequenas quantidades de nanopartículas de um material sólido (ex: alumínio, ferro, entre muitos outros), que à partida apresentam melhores propriedades de condução de calor. Com isto, é também interessante, analisar até que ponto o nível de concentração desse material pode à partida ser mais vantajoso ou não, (Ribeiro *et al.*, 2016).

Neste capítulo são apresentados os resultados, bem como a análise, das simulações feitas para dois nanofluidos, um é a mistura de água com nanopartículas de alumina (água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o outro é a mistura de água com dióxido de titânio (água/ $\text{TiO}_2$ ). Os estudos restringem-se ao regime de escoamento laminar e para escoamentos não desenvolvidos.

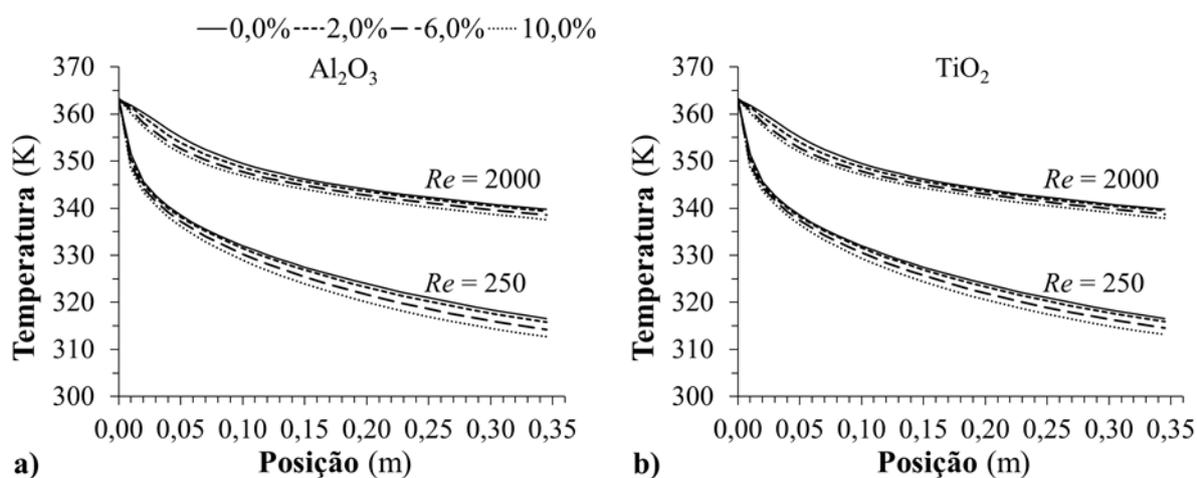
### 5.1 Nanofluidos

Nesta secção são apresentados os resultados para o escoamento e transferência de calor dos nanofluidos (água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  e água/ $\text{TiO}_2$ ) num tubo de um radiador de automóvel. O estudo é limitado a concentrações de nanopartículas até 10,0 % e a escoamentos laminares caracterizados pelos números de Reynolds 250 e 2000.

Pretende-se com este estudo verificar a influência da presença de nanopartículas de alumina e dióxido de titânio, bem como das diferentes concentrações destas, nas propriedades do escoamento do nanofluido, que possam ser relevantes para a transferência de calor. Assim, começamos por apresentar o estudo para o caso onde as propriedades do fluido base (água) são independentes da temperatura e de seguida é comparado com o caso em que as propriedades da água são dependentes da temperatura.

### 5.1.1 Propriedades da água independentes da temperatura

Neste caso, as propriedades da água são consideradas independentes da temperatura com valores dados pela Tabela 4.1 à temperatura de 30 °C. A Figura 5.1 mostra a evolução da temperatura do nanofluido água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  (esquerda) e do nanofluido água/ $\text{TiO}_2$  (direita) ao longo do tubo do radiador para as concentrações de alumina 0,0 %, 2,0 %, 6,0 % e 10,0 %, para  $Re = 250$  e 2000. A temperatura decresce ao longo tubo e com a concentração de nanopartículas. As maiores diferenças entre as temperaturas ocorrem na saída do tubo.



**Figura 5.1** - Temperatura ao longo do tubo em função da concentração de nanopartículas. a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ ; b)  $\text{TiO}_2$  para  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ .

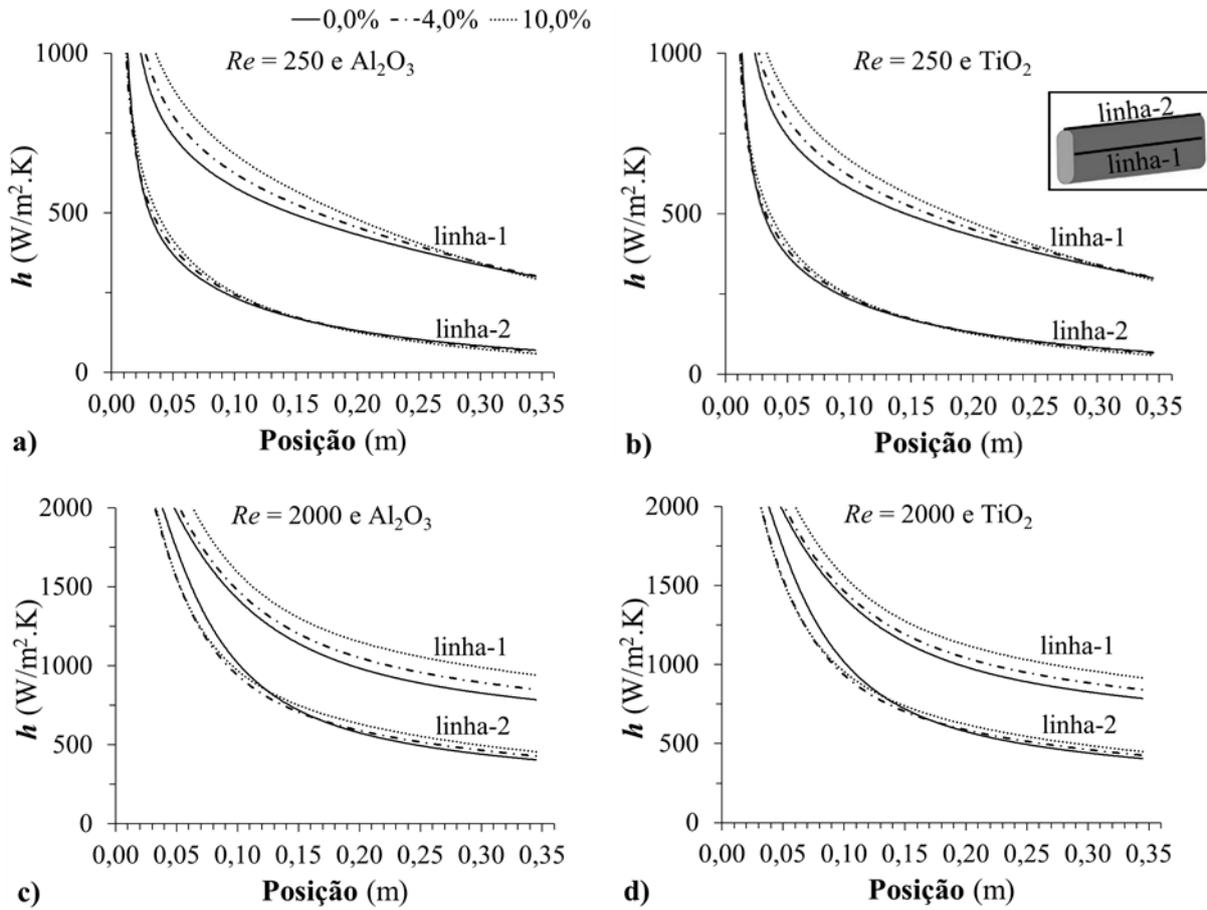
Para o nanofluido com nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , no caso em que  $Re = 250$ , a temperatura na entrada é de 363,15 K (90 °C) e decresce até valores de 316,59 K e 312,68 K, para as concentrações 0,0 % e 10,0 % respectivamente. Perfazendo, assim, uma diferença entre a temperatura do nanofluido na entrada e na saída de 46,56 K para 0,0 % (apenas água) e de 50,47 K para a concentração de 10,0 % de alumina. Assim, a adição de 10,0 % de nanopartículas de alumina permite um arrefecimento de cerca de 4 K do líquido refrigerador. Para o caso em que  $Re = 2000$ , com a temperatura de entrada também de 363,15 K, à saída registaram-se valores de 339,78 K e 337,57 K, para as concentrações 0,0 % e 10,0 % respectivamente. Ou seja, uma diferença de temperatura do nanofluido desde a entrada até à saída de 23,37 K para 0,0 % de nanopartículas e 25,58 K para a concentração de 10,0 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Fazendo uma diferença de cerca de 2 K entre uma concentração e a outra.

Em relação ao nanofluido com concentrações de  $\text{TiO}_2$ , tendo em conta que o caso com concentração 0,0 % é igual ao anterior, interessa analisar e comparar quando a concentração é diferente de zero. Para  $Re = 250$ , a temperatura vai descendo desde a temperatura de entrada de 363,15 K até 313,16 K à saída. Ou seja comparado com o caso da alumina, os valores são semelhantes, parecendo que a alumina possa ser ligeiramente mais eficiente pois para a concentração de 10,0 % desce até 312,68 K, mais 1 K do que o dióxido de titânio. A diferença de temperatura do fluido entre a entrada até à saída do tubo é de 49,99 K para a concentração de 10,0 % de  $\text{TiO}_2$ . Fazendo uma diferença no arrefecimento de cerca de 3 K, entre utilizar 10,0 % de nanopartículas de dióxido de titânio ou usar apenas água. No caso do  $Re = 2000$ , a temperatura do nanofluido baixa desde os 363,15 K até 337,90 K, para concentrações de 10,0 %, não havendo assim uma diferença significativa entre o uso da alumina ou do dióxido de titânio. Ou seja, a temperatura desce 25,25 K entre a entrada e a saída do tubo.

Desta análise, podemos inferir que a eficiência de arrefecimento do refrigerante do radiador pode ser melhorada com o aumento da concentração de nanopartículas de alumina ou de dióxido de titânio. Também depreende-se que quanto maior o número de Reynolds  $Re$ , menor é o abaixamento da temperatura do tubo, alcançando em ambos estes casos, diferenças na casa dos 20 K entre  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ . No entanto é preciso ter em conta que quanto maior o  $Re$  maior é a velocidade do escoamento, ou seja, apesar do  $Re = 250$  aparentemente conseguir baixar mais a temperatura em relação ao  $Re = 2000$ , números de  $Re$  mais elevados permitem uma maior transferência de calor por convecção no mesmo intervalo de tempo ou seja o fluido dá um maior número de voltas no radiador transportando uma maior quantidade de calor o que poderá ser vantajoso em termos de refrigeração num automóvel. Outra conclusão a retirar é que não se verifica grandes diferenças entre utilizar nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou de  $\text{TiO}_2$ .

A Figura 5.2 mostra o coeficiente de transferência de calor local ( $h$ ) ao longo do tubo, em função da concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{TiO}_2$ . As linhas, linha-1 e linha-2, identificam as linhas ao longo da parede do tubo usadas para calcular o  $h$  local. A necessidade de fazer o estudo ao longo das duas linhas, deve-se ao facto da secção do tubo ser quase oval, logo a geometria não sendo igual em todos os pontos,  $h$  terá valores diferentes. A linha-1 está localizada numa das secções curvas do tubo e a linha-2 numa das secções retas, ver canto superior direito da Figura 5.2 b). Note que na Figura 5.2 só são mostrados os resultados para valores de  $h$  até 1000  $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$  no caso de  $Re = 250$  e de  $h$  até 2000  $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$  para  $Re = 2000$ , a fim de se evidenciar os efeitos

da concentração de alumina e de dióxido de titânio no  $h$ . Em todos os casos presentes, para a linha-1 e linha-2, o  $h$  diminui ao longo do tubo, sendo o efeito mais pronunciado para a linha-2.



**Figura 5.2** - Coeficiente de transferência de calor  $h$  ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função da concentração: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Em relação a  $Re = 250$ , Figura 5.2 a) e Figura 5.2 b), o efeito da concentração de alumina e de dióxido de titânio no  $h$  é maior ao longo da linha-1 com uma diferença máxima de  $3368,72 \text{ W/m}^2.K$  e de  $3228,29 \text{ W/m}^2.K$  respectivamente, ocorrendo na concentração de  $10,0 \%$ , entre a entrada e a saída do tubo. Ao longo da linha-1, em geral, o  $h$  cresce com a concentração. No entanto, este comportamento deixa de se verificar na parte final do tubo, para ambos os nanofluidos. Para a linha-2 o efeito da concentração dos nanofluidos no  $h$  é menor do que para a linha-1. A diferença máxima, entre a entrada e a saída, é observada para a concentração de  $10,0 \%$ , no caso da alumina é  $3498,25 \text{ W/m}^2.K$  e no caso do dióxido de titânio é  $3361,76 \text{ W/m}^2.K$ . É de notar que a concentração também tem efeitos opostos ao longo desta linha. Sendo que  $h$  diminui com a concentração no início e no final do tubo, existindo uma zona

intermédia entre  $\sim 0,02$  m e  $\sim 0,15$  m para a alumina e para o dióxido de titânio, onde o comportamento é o oposto. Estes comportamentos podem estar relacionados com a geometria das regiões onde se localizam as linhas, linha-1 está sobre uma superfície plana e linha-2 sobre uma superfície curva.

Quando  $Re = 2000$ , Figura 5.2 c) e d), na linha-1, para a concentração de 10,0 % obtém-se a diferença máxima, com  $2802,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $2681,67 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , respetivamente para  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e para  $\text{TiO}_2$ . Nestes dois casos, ao longo da linha-1 o  $h$  cresce com a concentração. Ao contrário do verificado para  $Re = 250$ , em que este comportamento deixa de se verificar junto à saída do tubo. Para a linha-2 o efeito da concentração no  $h$  tem a diferença máxima entre a entrada e a saída do tubo, de  $3184,32 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para alumina e de  $3050,44 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para o dióxido de titânio, para a concentração de 10,0 %. É de notar que a concentração tem efeitos opostos ao longo desta linha, ao contrário do que acontece para a linha-1, com  $Re = 2000$ . Sendo que  $h$  diminui com o aumento da concentração até a posição  $\sim 0,15$  m do tubo, tendo o comportamento oposto para posições maiores do que  $\sim 0,15$  m, em ambos os nanofluidos.

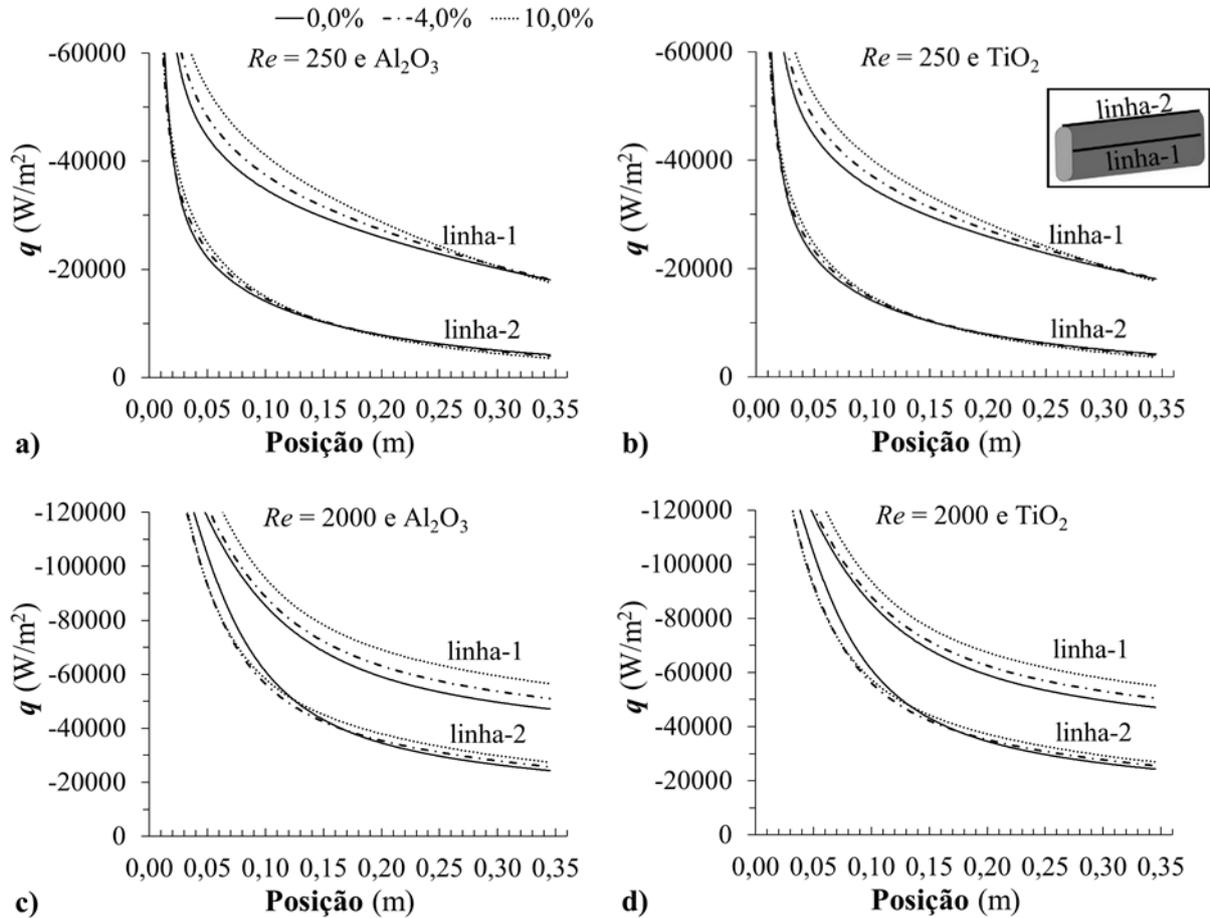
Daqui podemos ver que o  $h$  varia mais para os casos em que  $Re$  é menor, em termos de diferenças máximas entre a entrada e saída do tubo. No entanto entre as concentrações, a variação é maior quando  $Re = 2000$ . Também desta análise, podemos dizer que a transferência de calor é menor ao longo da linha-2, secção mais curva do tubo.

A Figura 5.3 apresenta o fluxo de calor  $q$  ao longo do tubo, em função da concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{TiO}_2$ . O fluxo de calor tem um comportamento qualitativamente idêntico ao do coeficiente de transferência de calor  $h$ , Figura 5.2. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de estarem relacionados pela equação (2.27). O sinal negativo de  $q$  significa que o nanofluido perde calor para o exterior. Note que na Figura 5.3 só são mostrados os resultados para valores de  $q$  até  $60000 \text{ W/m}^2$  para  $Re = 250$ , e até  $120000 \text{ W/m}^2$  para  $Re = 2000$ , a fim de se evidenciar os efeitos das concentrações de nanopartículas no  $q$ .

Quando  $Re = 250$  e para a alumina, a diferença máxima de  $q$  entre a entrada e a saída do tubo é de  $202 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1 e de  $209 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2, para a concentração de 10,0 %. Para o dióxido de titânio a diferença máxima de  $q$ , entre a entrada e a saída do tubo, é de  $193 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1 e de  $201 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2, para a concentração de 10,0 %.

Para  $Re = 2000$ , a variação do fluxo de calor entre a entrada e a saída do tubo são menores, sendo para a alumina  $168 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1 e de  $191 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2. Para o dióxido

de titânio é de 161 kW/m<sup>2</sup> para a linha-1 e de 183 kW/m<sup>2</sup> para a linha-2. Ambos os casos referidos são para a concentração de 10,0 %.



**Figura 5.3** - Fluxo de calor  $q$  ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função da concentração: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Na Figura 5.4 é apresentado o número de Nusselt local  $Nu$ , este parâmetro também é analisado ao longo da parede do tubo através da linha-1 e linha-2, anteriormente descritas. Note-se que os dados estão apresentados numa escala semilogarítmica, para uma melhor percepção das suas variações.

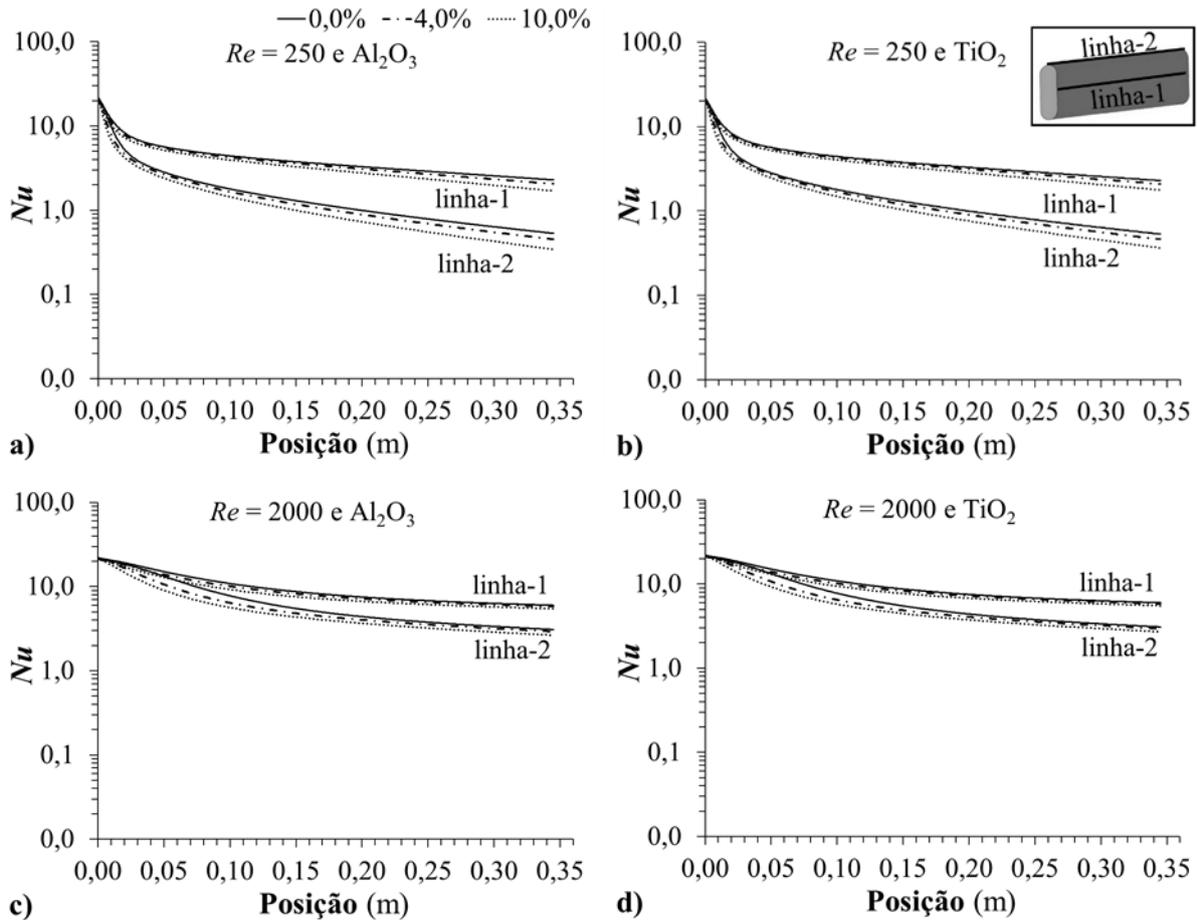
Para todos os casos em análise na Figura 5.4, os valores de  $Nu$  diminuem ao longo tubo para ambas as linhas, ocorrendo maior diminuição ao longo da linha-2. O mesmo acontece com os efeitos da concentração, tanto de alumina como de dióxido de titânio, que também diminui o  $Nu$  com o aumento da concentração. Podemos concluir daqui, pela equação (2.28), que ao

longo do escoamento no tubo, a transferência de calor realiza-se cada vez mais por condução do que por convecção, sendo este tipo de transferência também mais influenciado com o aumento da concentração de nanopartículas. Contudo a transferência de calor com o meio ambiente é maior por convecção uma vez que é influenciada diretamente pelas condições de escoamento do fluido, isto é, aumenta com o número de Reynolds.

Para  $Re = 250$ , em relação à linha-1, é nesta que se verifica o valor máximo de  $Nu$  de 21,38 para a concentração de 0,0% à entrada do tubo. Na saída do tubo obteve-se o valor de  $Nu = 2,28$ . Já com a adição de nanopartículas, particularmente para a concentração de 10,0 %, apesar de  $Nu$  à entrada ser ligeiramente menor (21,20) este acaba por ter à saída o valor de  $\sim 1,70$  para o caso da alumina. Para a mesma concentração mas para o dióxido de titânio, o valor de  $Nu$  à entrada é de 21,22 e na saída é de  $\sim 1,77$ . Na linha-2 verifica-se o mesmo comportamento, onde para 0,0 % temos 20,77 e 0,53 na entrada e na saída do tubo, respetivamente. Para a concentração de 10,0 % de alumina, temos na entrada  $\sim 20,60$  e na saída o valor 0,34. Para o caso em que a concentração é 10,0 % de dióxido de titânio temos na entrada  $\sim 20,62$  e à saída o valor 0,37.

Para  $Re = 2000$ , com a concentração de 10,0 % de alumina temos, à entrada 21,67 e à saída o valor de  $\sim 5,45$ , na linha-1. Na linha-2, à entrada temos  $\sim 21,08$  e à saída 2,64. Para a concentração de 10,0 % de dióxido de titânio, temos na linha-1, à entrada 21,68 e à saída o valor de  $\sim 5,53$ . Enquanto na linha-2, temos  $\sim 21,08$  e 2,70, na entrada e na saída respetivamente.

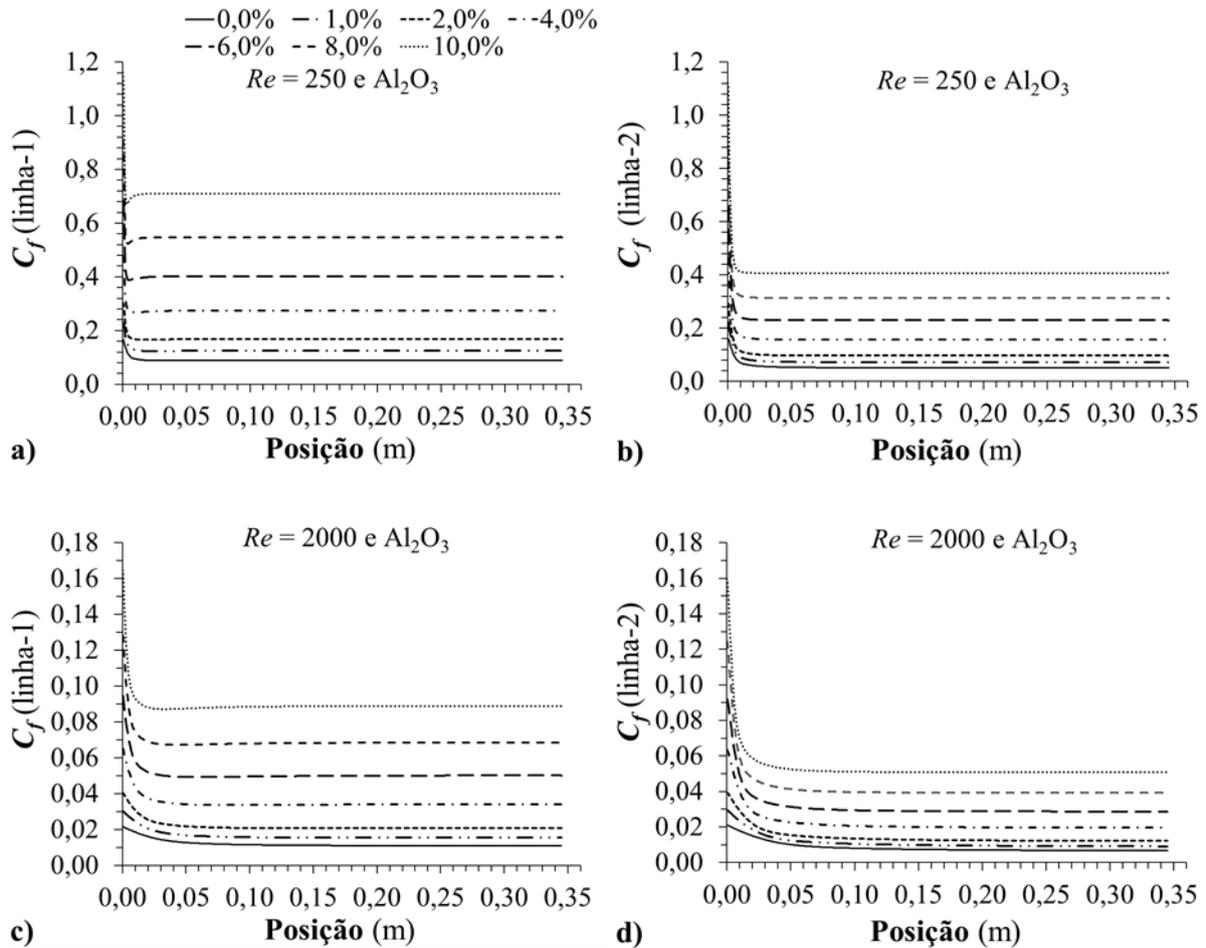
Verificamos assim que estas diferenças são ligeiramente menores quando  $Re = 2000$  em relação a  $Re = 250$ , onde a principal distinção está na maior diminuição de  $Nu$  na parte final do tubo para  $Re = 250$ .



**Figura 5.4** - Número de Nusselt  $Nu$  ao longo do tubo, em função da concentração: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Na Figura 5.5 está representado o coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo da parede do tubo, ao longo da linha-1 e da linha-2, para  $Re = 250$  e  $Re = 2000$  e com concentrações de alumina entre 0,0 % e 10,0 %. O  $C_f$  é definido de acordo com a equação (2.17).

O comportamento de  $C_f$  é similar ao longo da linha-1 e da linha-2. Em ambos os casos após a entrada do nanofluido no tubo há uma queda acentuada do  $C_f$  para depois estabilizar num valor que se mantém praticamente constante até à saída do tubo. Observa-se que para a linha-2 os valores de  $C_f$  caem para valores mais baixos que para a linha-1. Como era esperado, os valores de  $C_f$  vão aumentando à medida que se aumenta a concentração de nanopartículas de alumina.



**Figura 5.5** - Coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo do tubo, em função da concentração de  $Al_2O_3$ . a)  $Re = 250$  ao longo da linha-1; b)  $Re = 250$  ao longo da linha-2; c)  $Re = 2000$  ao longo da linha-1; d)  $Re = 2000$  ao longo da linha-2.

Em relação a  $Re = 250$ , para a linha-1, Figura 5.5 a) verifica-se, à entrada, o valor mais alto de 1,16 quando a concentração é de 10,0 %, decrescendo rapidamente e estabilizando ao longo do tubo em  $\sim 0,71$ . Para a linha-2, Figura 5.5 b), o valor de  $C_f$  cai de 1,12 na entrada e estabiliza em  $\sim 0,40$  para a concentração de 10,0 %. Os menores valores de  $C_f$  são observados quando temos apenas água, na saída com os valores de 0,089 e de 0,051 para linha-1 e linha-2, respectivamente. Tendo em conta que à entrada temos 0,165 (linha-1) e 0,160 (linha-2), a maior diferença entre a entrada e a saída do tubo ocorre para a linha-2, quando a concentração é de 0,0 %.

Em relação a  $Re = 2000$ , Figura 5.5 c) e d), observa-se logo inicialmente pela escala de valores, que os valores de  $C_f$  atingidos são bem menores do que os de  $Re = 250$ . Para a linha-1 verifica-se, à entrada, o valor mais alto de 0,164 quando a concentração é de 10,0 %, decrescendo rapidamente e estabilizando ao longo do tubo em  $\sim 0,09$ . Para a linha-2, Figura 5.5 d), o valor de  $C_f$  cai de 0,160 na entrada e estabiliza em  $\sim 0,05$  para a concentração de 10,0 %. Os menores valores de  $C_f$  são observados quando temos apenas água, na saída com os valores de 0,015 e de 0,010 para linha-1 e linha-2, respectivamente. Tendo em conta que à entrada temos 0,165 (linha-1) e 0,160 (linha-2), a maior diferença entre a entrada e a saída do tubo ocorre para a linha-2, quando a concentração é de 0,0 %.

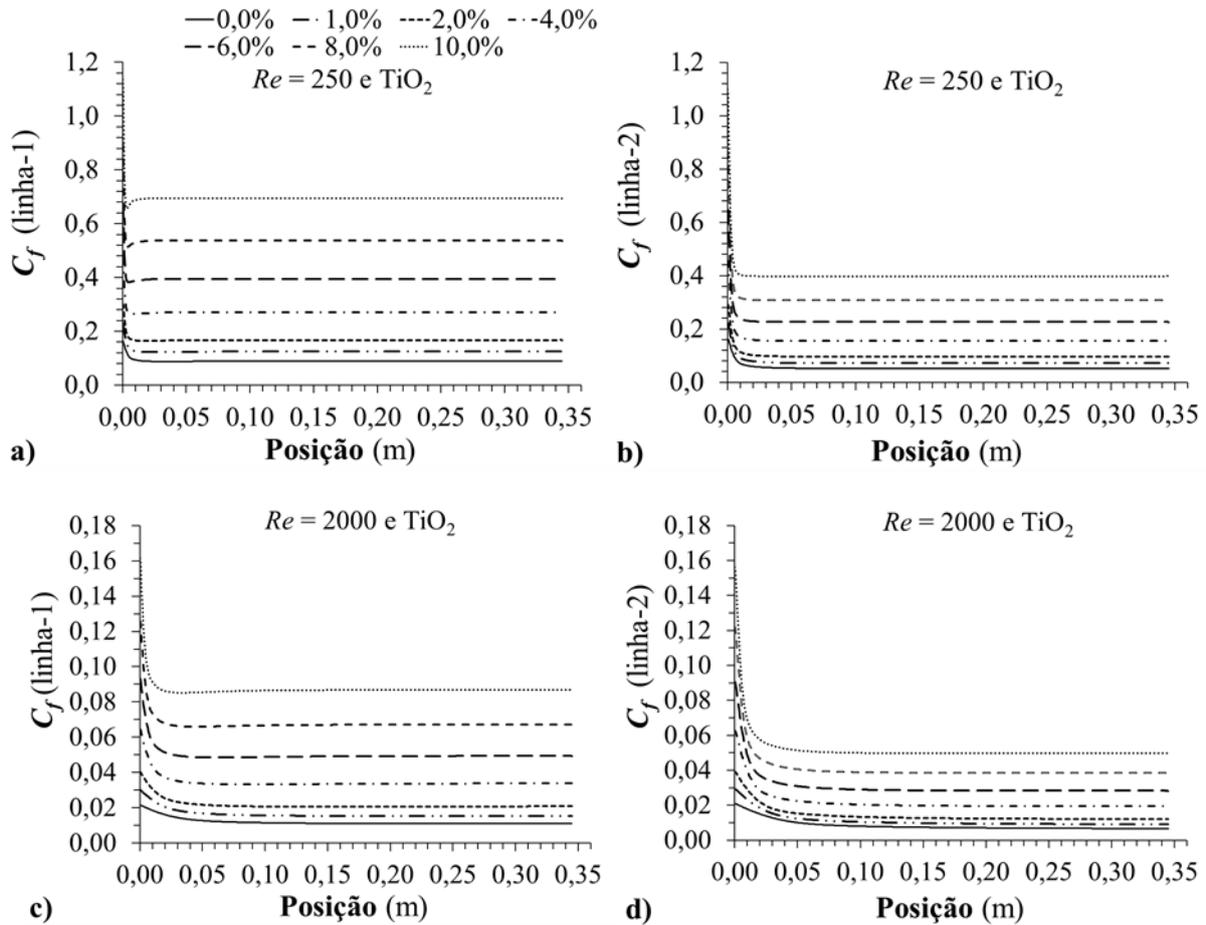
decrecendo rapidamente e estabilizando ao longo do tubo em  $\sim 0,88$ . Ao longo da linha-2, para a mesma concentração, o valor de  $C_f$  cai de 0,59 na entrada e estabiliza em  $\sim 0,05$ .

Pela equação (2.17) podemos concluir que o aumento da concentração de alumina faz diminuir o número de Reynolds que por sua vez faz aumentar o  $C_f$ . Da mesma maneira se aumentarmos o valor de  $Re$ , o  $f$  vai ser menor e consecutivamente o  $C_f$ , segundo a equação (2.29).

À semelhança da figura anterior, também na Figura 5.6 está representado o  $C_f$ , mas agora para a variação de concentrações de nanopartículas de dióxido de titânio. O comportamento observado é qualitativamente idêntico ao caso da alumina, havendo apenas uma ligeira descida da grandeza dos valores em relação à alumina.

Interessa então apenas, reportar os valores mais importantes a reter. Quando  $Re = 250$ , para a linha-1 verifica-se, à entrada, o valor mais alto de  $C_f = 1,13$  quando a concentração é de 10,0 %, decrescendo rapidamente e estabilizando ao longo do tubo em  $\sim 0,69$ . Para a linha-2, o valor de  $C_f$  cai de 1,10 na entrada e estabiliza em  $\sim 0,40$ .

Para  $Re = 2000$ , na linha-1 temos à entrada 0,161 quando a concentração é de 10,0 %, descendo até  $\sim 0,087$ . Para a linha-2, na mesma concentração, o valor de  $C_f$  cai de 0,156 na entrada e estabiliza em  $\sim 0,049$ .



**Figura 5.6** - Coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo do tubo, em função da concentração de  $\text{TiO}_2$ : a)  $Re = 250$  ao longo da linha-1; b)  $Re = 250$  ao longo da linha-2; c)  $Re = 2000$  ao longo da linha-1; d)  $Re = 2000$  ao longo da linha-2.

Uma vez que este caso foi estudado para as propriedades das misturas, água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  e água/ $\text{TiO}_2$ , independentes da temperatura, algumas das propriedades das misturas mantêm-se constantes ao longo do tubo, como é o caso da massa volúmica, do calor específico, da condutividade térmica ou da viscosidade, o que torna desinteressante apresentar esses dados graficamente ao longo do tubo. Assim, de seguida é apresentado uma tabela, que resume estas propriedades. Alguns desses dados já foram apresentados graficamente atrás e analisados de acordo com a posição ao longo do tubo. Nas Tabela 5.1-5.4, são apresentados os valores médios da velocidade  $v$ , temperatura  $T$ , massa volúmica  $\rho$ , calor específico  $c_p$ , condutividade térmica  $k$ , viscosidade  $\mu$ , e os valores característicos do escoamento, número de Reynolds  $Re$ , coeficiente de atrito  $C_f$ , o coeficiente de transferência de calor  $h$ , o fluxo de calor  $q$  o número de Nusselt  $Nu$ , número de Prandtl  $Pr$ , queda de pressão  $\Delta p$ , potência requerida para circulação do fluido  $P$  e redução ou ganho de potência  $P_R$  em relação ao caso onde existe apenas água. Relembrando que estes parâmetros estão definidos no Capítulo 2.

Tendo isto em conta, de seguida apresenta-se a Tabela 5.1 e 5.2, ambas para as concentrações de nanopartículas de alumina. A Tabela 5.1 com os valores médios para a condição de  $Re = 250$  e a Tabela 5.2 para a condição de  $Re = 2000$ , determinadas a partir das propriedades da água na entrada do tubo à temperatura de 303,15 K. O facto de utilizar estas duas condições influencia diretamente a velocidade na entrada que é inserida no *software*, onde através da equação (2.20), para  $Re = 250$  a velocidade inicial é de  $v = 0,0429$  m/s enquanto para  $Re = 2000$  temos  $v = 0,3434$  m/s. De notar que estes mesmos valores também são apresentados nas tabelas, no entanto eles não são iguais, uma vez que tal como já foi dito, os valores das tabelas são obtidos para a média de todo domínio computacional menos as paredes do tubo. Com a exceção dos dados referentes à transferência de calor entre o tubo e o exterior, como o  $C_f$ , o  $Nu$ , o  $q$  e o  $h$ , que são obtidos apenas e exclusivamente nas paredes do tubo.

O comportamento dos parâmetros mostrados em ambas as tabelas segue a mesma tendência. Com o aumento da concentração de alumina, há também o aumento da diferença de pressão  $\Delta p$ , da massa volúmica  $\rho$ , da viscosidade  $\mu$ , da condutividade térmica  $k$ , do número de Prandtl  $Pr$ , do coeficiente de atrito  $C_f$ , do fluxo de calor  $q$  (negativo, pois há fluxo calor do interior para exterior), do coeficiente de transferência de calor  $h$  e da potência  $P$  que por sua vez faz aumentar a potência requerida  $P_R$  para o fluido circular, em relação a ter apenas água (0,0 %). Pelo contrário, o aumento da concentração provoca o decréscimo de temperatura  $T$  (que é pretendido), do número de Reynolds  $Re$ , do calor específico  $c_p$ , e do número de Nusselt  $Nu$ .

A maior diferença entre  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ , é que neste último caso (Tabela 5.2), as gamas de variação dos parâmetros variáveis são de maior magnitude, à exceção de  $C_f$ . Tendo em conta que as propriedades dos fluidos ( $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ ) bem como  $Pr$  e  $Nu$  são iguais nos dois casos, isto porque foram obtidos considerando as propriedades independentes das temperaturas, logo são constantes. Quanto à velocidade, é praticamente constante, uma vez que o caudal é o mesmo para todas as concentrações estudadas. No entanto, notar que para  $Re = 2000$ , houve uma pequena variação da velocidade, com uma pequena descida com o aumento de concentração, contudo esta pequena variação deverá estar associada aos erros numéricos atendendo à lei da conservação da massa ou ao aumento de  $Re$  que poderá ter alguma influência em algum dos parâmetros associados ao cálculo da velocidade (equação (2.20)). Esse erro é mínimo, pois como exemplo, para o caso mais extremo (10,0 %) o erro em relação à entrada é de 0,4%.

**Tabela 5.1** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com as propriedades independentes da temperatura e calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada  $Re = 250$  ( $v = 0,0429$  m/s).

| Nanofluido                  | água/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (propriedades independentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)  | 0,0     | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 258,81  | 236,79  | 184,37  | 137,18  | 84,45   | 57,64   | 42,23   | 32,55   |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 9,67    | 10,64   | 13,94   | 19,24   | 32,95   | 50,76   | 72,70   | 98,75   |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 995,35  | 1002,56 | 1024,20 | 1053,04 | 1110,74 | 1168,43 | 1226,12 | 1283,81 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  |
| $T$ (K)                     |   | 329,05  | 328,97  | 328,72  | 328,38  | 327,66  | 326,93  | 326,19  | 325,45  |
| $\mu$ (mPa s)               |   | 0,8000  | 0,8807  | 1,1553  | 1,5962  | 2,7342  | 4,2138  | 6,0350  | 8,1978  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6146  | 0,6190  | 0,6323  | 0,6504  | 0,6875  | 0,7262  | 0,7664  | 0,8083  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4179,64 | 4146,68 | 4050,59 | 3928,60 | 3703,64 | 3500,90 | 3317,23 | 3150,07 |
| $Pr$                        |   | 5,44    | 5,90    | 7,40    | 9,64    | 14,73   | 20,32   | 26,12   | 31,95   |
| $C_f$                       |   | 0,0728  | 0,0794  | 0,1016  | 0,1359  | 0,2198  | 0,3214  | 0,4381  | 0,5679  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -25,310 | -25,367 | -25,543 | -25,786 | -26,277 | -26,758 | -27,221 | -27,662 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 421,84  | 422,79  | 425,73  | 429,77  | 437,96  | 445,98  | 453,69  | 461,04  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 3,22    | 3,20    | 3,15    | 3,09    | 2,98    | 2,87    | 2,77    | 2,67    |
| $P$ (mW)                    |   | 1,073   | 1,180   | 1,547   | 2,135   | 3,654   | 5,630   | 8,063   | 10,951  |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 10,02   | 44,15   | 98,98   | 240,58  | 424,74  | 651,43  | 920,65  |

**Tabela 5.2** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada  $Re = 2000$  ( $v = 0,3434$  m/s).

| Nanofluido                  | água/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (propriedades independentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)  | 0       | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 2079,05 | 1901,90 | 1480,20 | 1100,64 | 676,96  | 461,76  | 338,19  | 260,61  |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 87,55   | 94,94   | 120,26  | 161,37  | 268,90  | 410,09  | 584,70  | 792,52  |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 995,35  | 1002,56 | 1024,20 | 1053,04 | 1110,74 | 1168,43 | 1226,12 | 1283,81 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,3571  | 0,3570  | 0,3568  | 0,3565  | 0,3561  | 0,3558  | 0,3557  | 0,3556  |
| $T$ (K)                     |   | 348,99  | 348,90  | 348,67  | 348,41  | 347,94  | 347,51  | 347,09  | 346,66  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,8000  | 0,8807  | 1,1553  | 1,5962  | 2,7342  | 4,2138  | 6,0350  | 8,1978  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6146  | 0,6190  | 0,6323  | 0,6503  | 0,6875  | 0,7261  | 0,7663  | 0,8083  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4179,64 | 4146,68 | 4050,59 | 3928,60 | 3703,64 | 3500,90 | 3317,23 | 3150,07 |
| $Pr$                        |   | 5,44    | 5,90    | 7,40    | 9,64    | 14,73   | 20,31   | 26,12   | 31,95   |
| $C_f$                       |   | 0,0103  | 0,0112  | 0,0140  | 0,0183  | 0,0288  | 0,0415  | 0,0560  | 0,0723  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -68,041 | -68,047 | -68,208 | -68,676 | -70,118 | -71,896 | -73,834 | -75,863 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 1134,02 | 1134,13 | 1136,81 | 1144,61 | 1168,64 | 1198,28 | 1230,57 | 1264,39 |
| $Nu_{méd}$                  |   | 8,64    | 8,57    | 8,41    | 8,24    | 7,96    | 7,72    | 7,52    | 7,32    |
| $P$ (mW)                    |   | 78,061  | 84,632  | 107,142 | 143,648 | 239,098 | 364,387 | 519,317 | 703,717 |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 8,42    | 37,25   | 84,02   | 206,30  | 366,80  | 565,27  | 801,50  |

De seguida são apresentadas as Tabelas 5.3 e 5.4 para o nanofluido água/TiO<sub>2</sub>, contendo o mesmo conteúdo informativo que as anteriores.

Não há muito a dizer, sobre isto, o comportamento é em tudo igual ao descrito anteriormente para o nanofluido água/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, inclusive os valores são muito próximos dos verificados nos casos de alumina, com uma ligeira impressão que talvez a alumina seja um nanofluido um pouco melhor no que toca à transferência de calor em especial na refrigeração, descendo um pouco mais a temperatura, no entanto essa descida não chega a 1 K.

**Tabela 5.3** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/TiO<sub>2</sub> com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada  $Re = 250$  ( $v = 0,0429$  m/s).

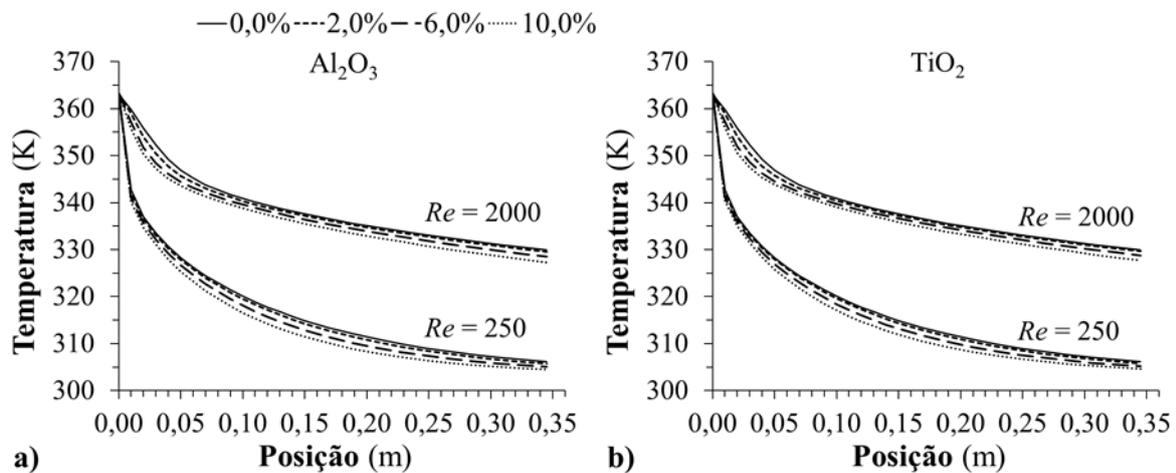
| Nanofluido                  | água/TiO <sub>2</sub> (propriedades independentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | TiO <sub>2</sub> (%)  | 0       | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 258,81  | 236,97  | 184,90  | 137,95  | 85,35   | 58,51   | 43,04   | 33,30   |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 9,67    | 10,64   | 13,94   | 19,24   | 32,94   | 50,76   | 72,70   | 98,75   |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 995,35  | 1003,29 | 1027,14 | 1058,94 | 1122,53 | 1186,12 | 1249,72 | 1313,31 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  | 0,0444  |
| $T$ (K)                     |   | 329,05  | 328,98  | 328,76  | 328,47  | 327,85  | 327,21  | 326,56  | 325,92  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,8000  | 0,8806  | 1,155   | 1,596   | 2,734   | 4,213   | 6,034   | 8,197   |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6146  | 0,6183  | 0,6296  | 0,6449  | 0,6762  | 0,7086  | 0,7421  | 0,7768  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4179,64 | 4143,35 | 4037,88 | 3904,63 | 3660,78 | 3443,08 | 3247,53 | 3070,92 |
| $Pr$                        |   | 5,44    | 5,90    | 7,40    | 9,66    | 14,80   | 20,47   | 26,40   | 32,40   |
| $C_f$                       |   | 0,0727  | 0,0793  | 0,1012  | 0,1351  | 0,2175  | 0,3165  | 0,4298  | 0,5551  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -25,310 | -25,354 | -25,493 | -25,687 | -26,084 | -26,475 | -26,853 | -27,213 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 421,84  | 422,57  | 424,89  | 428,12  | 434,73  | 441,25  | 447,55  | 453,56  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 3,22    | 3,19    | 3,15    | 3,10    | 3,00    | 2,91    | 2,82    | 2,73    |
| $P$ (mW)                    |   | 1,072   | 1,180   | 1,546   | 2,135   | 3,654   | 5,630   | 8,062   | 10,951  |
| $P_R$ (%)                   |   |         | 10,016  | 44,14   | 98,98   | 240,58  | 424,74  | 651,43  | 920,65  |

**Tabela 5.4** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/TiO<sub>2</sub> com as propriedades independentes da temperatura calculadas à temperatura constante (303,15 K). Condição de entrada  $Re = 2000$  ( $v = 0,3434$  m/s).

| Nanofluido                  | Água/TiO <sub>2</sub> (propriedades independentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | TiO <sub>2</sub> (%)  | 0       | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 2079,05 | 1903,36 | 1484,47 | 1106,82 | 684,16  | 468,76  | 344,70  | 266,60  |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 87,55   | 94,94   | 120,30  | 161,44  | 269,01  | 410,21  | 584,81  | 792,63  |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 995,35  | 1003,29 | 1027,14 | 1058,94 | 1122,53 | 1186,12 | 1249,72 | 1313,31 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,3571  | 0,3570  | 0,3568  | 0,3565  | 0,3560  | 0,3558  | 0,3557  | 0,3556  |
| $T$ (K)                     |   | 348,99  | 348,90  | 348,70  | 348,46  | 348,05  | 347,67  | 347,30  | 346,92  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,8000  | 0,8806  | 1,1552  | 1,5961  | 2,7341  | 4,2137  | 6,0349  | 8,1977  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6146  | 0,6183  | 0,6296  | 0,6449  | 0,6762  | 0,7086  | 0,7421  | 0,7768  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4179,64 | 4143,35 | 4037,88 | 3904,63 | 3660,78 | 3443,08 | 3247,53 | 3070,92 |
| $Pr$                        |   | 5,44    | 5,90    | 7,40    | 9,66    | 14,80   | 20,47   | 26,40   | 32,40   |
| $C_f$                       |   | 0,0103  | 0,0112  | 0,0139  | 0,0182  | 0,0285  | 0,0409  | 0,0550  | 0,0707  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -68,041 | -68,005 | -68,038 | -68,335 | -69,427 | -70,846 | -72,414 | -74,062 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 1134,02 | 1133,42 | 1133,97 | 1138,92 | 1157,12 | 1180,77 | 1206,91 | 1234,37 |
| $Nu_{méd}$                  |   | 8,64    | 8,57    | 8,42    | 8,26    | 8,00    | 7,79    | 7,61    | 7,43    |
| $P$ (mW)                    |   | 78,06   | 84,64   | 107,18  | 143,71  | 239,19  | 364,50  | 519,43  | 703,83  |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 8,43    | 37,30   | 84,10   | 206,42  | 366,94  | 565,42  | 801,65  |

### 5.1.2 Propriedades do fluido base dependentes da temperatura

Nesta subsecção, as propriedades da água são consideradas dependentes da temperatura, de acordo com as equações (4.1) a (4.4). A Figura 5.7 a) e b) mostra a evolução da temperatura de água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  e água/ $\text{TiO}_2$ , respetivamente, ao longo do tubo do radiador para as concentrações de alumina 0,0 %, 2,0 %, 6,0 % e 10,0 %. A temperatura decresce ao longo do tubo, em todas as situações estudadas, sendo este comportamento mais acentuado com o aumento da concentração de nanopartículas. Contudo para o valor de  $Re$  mais elevado, a diminuição da temperatura é menor.



**Figura 5.7** - Temperatura ao longo do tubo em função da concentração de nanopartículas, com as propriedades a depender da temperatura. a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ ; b)  $\text{TiO}_2$  para  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ .

Focando em valores mais concretos, para o caso das nanopartículas de alumina, com  $Re = 250$ , as maiores diferenças ocorrem com concentrações de 10,0 % com um decréscimo de quase 59 K, baixando desde 363,15 K à entrada até 304,46 K à saída do tubo, valor este que é próximo da temperatura imposta pela condição de fronteira definida para as paredes do tubo (igual ao meio exterior do automóvel), isto é a temperatura média do meio ambiente de 303,15 K (30 °C). Para a concentração de 0,0 % a temperatura do fluido na saída do tubo alcança uma temperatura de 306,12 K, que é mais alta em cerca de 2 K em relação à concentração de 10,0 %. Isto sugere que o arrefecimento do sistema automóvel pode ser otimizado com o aumento da concentração da alumina. Em relação a  $Re = 2000$ , com concentração de 0,0 % a temperatura na saída do tubo diminui até uma temperatura de 329,73 K, que é mais alta em cerca de 2 K em relação à concentração de 10,0 %, que tem uma

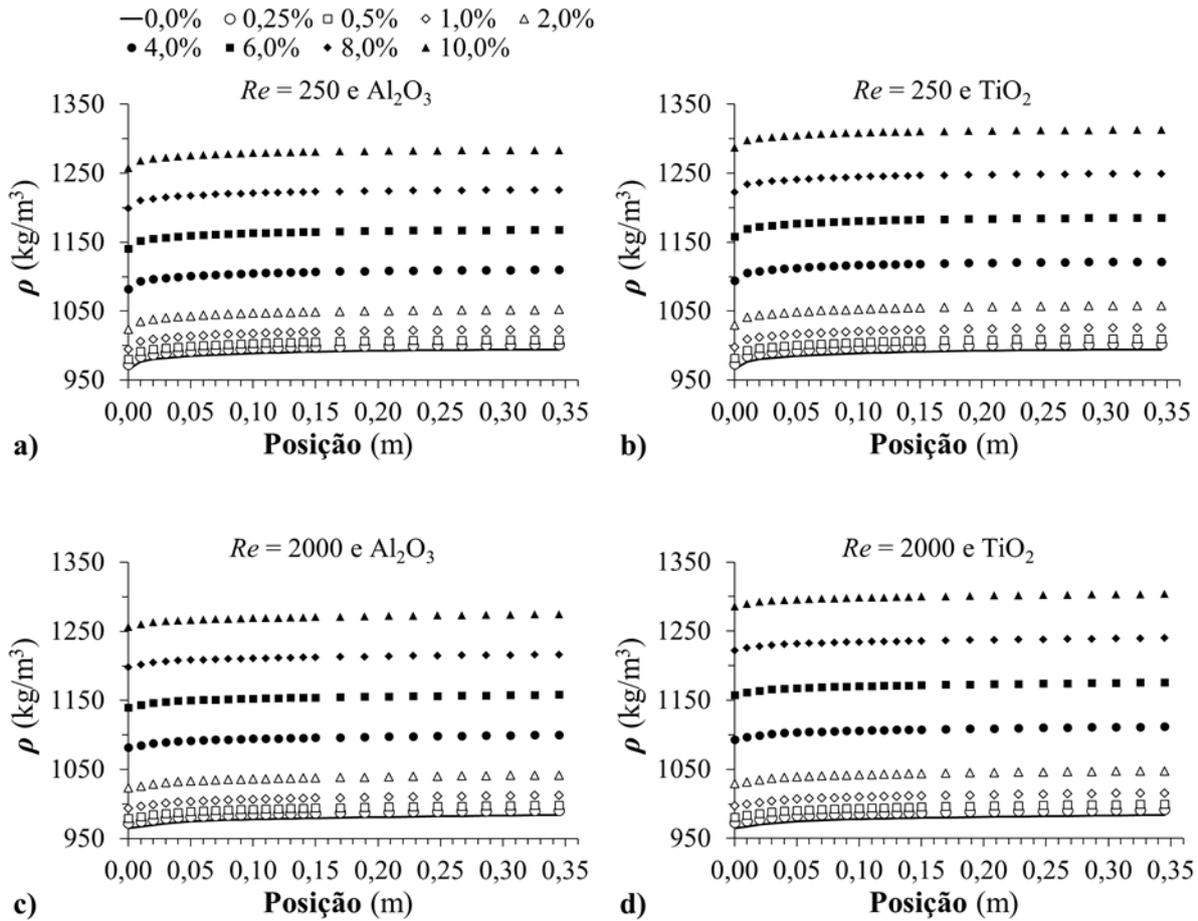
diminuição de quase 36 K, baixando desde os 363,15 K à entrada até 327,25 K na saída do tubo. Isto também sugere que para  $Re = 2000$ , o arrefecimento do sistema automóvel pode ser otimizado com o aumento da concentração da alumina. De notar, ainda, que comparando os casos  $Re = 250$  e  $Re = 2000$ , nas mesmas condições, verifica-se que a diminuição da temperatura é menor para o  $Re$  mais elevado.

Para o nanofluido com nanopartículas de dióxido de titânio, Figura 5.7 b), para  $Re = 250$  e concentração de 10,0 % há uma diminuição de quase 58,5 K, baixando desde os 363,15 K à entrada, até 304,63 K à saída do tubo. Para a mesma concentração, mas com  $Re = 2000$  há uma descida de 35,48 K, baixando desde os 363,15 K à entrada até 327,68 K na saída. O mesmo se pode afirmar, tal como para a alumina, que a adição de nanopartículas de dióxido de titânio poderá melhorar a eficiência de arrefecimento do sistema automóvel.

Comparando estes casos com os casos onde as propriedades são independentes da temperatura (303,15 K), para além de à partida ser mais realista o uso de propriedades dependentes da temperatura, também os resultados mostram ser benéficos em termos de arrefecimento, ao obter-se valores mais baixos da temperatura no final do tubo, com diferenças  $\sim 10$  K, com especial destaque para  $Re = 250$ , que atinge quase a temperatura da condição de fronteira do exterior, algo que não acontecia para as propriedades independentes da temperatura, ver Figura 5.1.

Uma vez que nesta subsecção, as propriedades dependem da temperatura, são apresentadas graficamente a variação de todas as propriedades estudadas ao longo do tubo. Para a massa volúmica, presente na Figura 5.8, observa-se que há um ligeiro aumento da massa volúmica ao longo do tubo, algo que se pode explicar pelo conhecimento da química, pois é do conhecimento científico que quanto maior a temperatura menor é a massa volúmica de um líquido e isso deve-se ao facto do volume de um líquido aumentar com o aumento da temperatura, volume esse que é inversamente proporcional à massa volúmica ( $\rho = m/V$ ), pois a massa para a mesma concentração é invariável com a temperatura, logo neste caso acontece o contrário, pois como se vê na Figura 5.7, a temperatura diminui ao longo do tubo, consequentemente a massa volúmica vai aumentar.

Também se pode ver que a massa volúmica aumenta com o aumento das concentrações, isto é facilmente explicável, através da Tabela 4.2, pois se as nanopartículas de  $Al_2O_3$  e de  $TiO_2$  têm maior massa volúmica do que a água, logo o aumento da concentração de partículas faz aumentar a massa volúmica do respetivo nanofluido.



**Figura 5.8** – Massa volúmica  $\rho$  ao longo do tubo, em função das concentrações: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Para  $Re = 250$  e 0,0 % de concentração, a massa volúmica aumentou, desde a entrada para a saída, de  $965,64 \text{ kg/m}^3$  para  $994,64 \text{ kg/m}^3$ . Para 10,0 % aumentou de  $1257,38 \text{ kg/m}^3$  para  $1283,45 \text{ kg/m}^3$ , com nanopartículas de alumina e de  $1286,85 \text{ kg/m}^3$  para  $1312,91 \text{ kg/m}^3$  com a adição de nanopartículas de dióxido de titânio. Ou seja, existe uma diferença máxima entre as concentrações de 0,0 % e 10,0 % de quase  $290 \text{ kg/m}^3$  e de  $318 \text{ kg/m}^3$  para  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$  respetivamente, à saída do tubo.

Com  $Re = 2000$  e concentração de 0,0 %, a massa volúmica entre a entrada e a saída do tubo aumentou de  $965,039 \text{ kg/m}^3$  para  $983,947 \text{ kg/m}^3$ . Para a concentração de 10,0 % de alumina o aumento foi de  $1256,57 \text{ kg/m}^3$  para  $1274,8 \text{ kg/m}^3$ . Para a mesma concentração de dióxido de titânio verificou-se o aumento de  $1286,06 \text{ kg/m}^3$  para  $1304,09 \text{ kg/m}^3$ . Ou seja, atingiu valores mais baixos do que os observados para  $Re = 250$ . Com isto, para as concentrações de 0,0 % e 10,0 %, existe uma diferença máxima entre a entrada e a saída do

tubo de quase  $290 \text{ kg/m}^3$  e de  $\sim 320 \text{ kg/m}^3$ , respetivamente, à semelhança do observado para  $Re = 250$ , nas mesmas condições.

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, uma vez que para este último o valor da massa volúmica é constante verifica-se que para o caso onde a massa volúmica é dependente da temperatura os valores são menores do que no caso em que as propriedades são independentes da temperatura (Tabelas 4.1 e 4.2) ou seja, a variação da temperatura tem influência na massa volúmica ao longo do tubo.

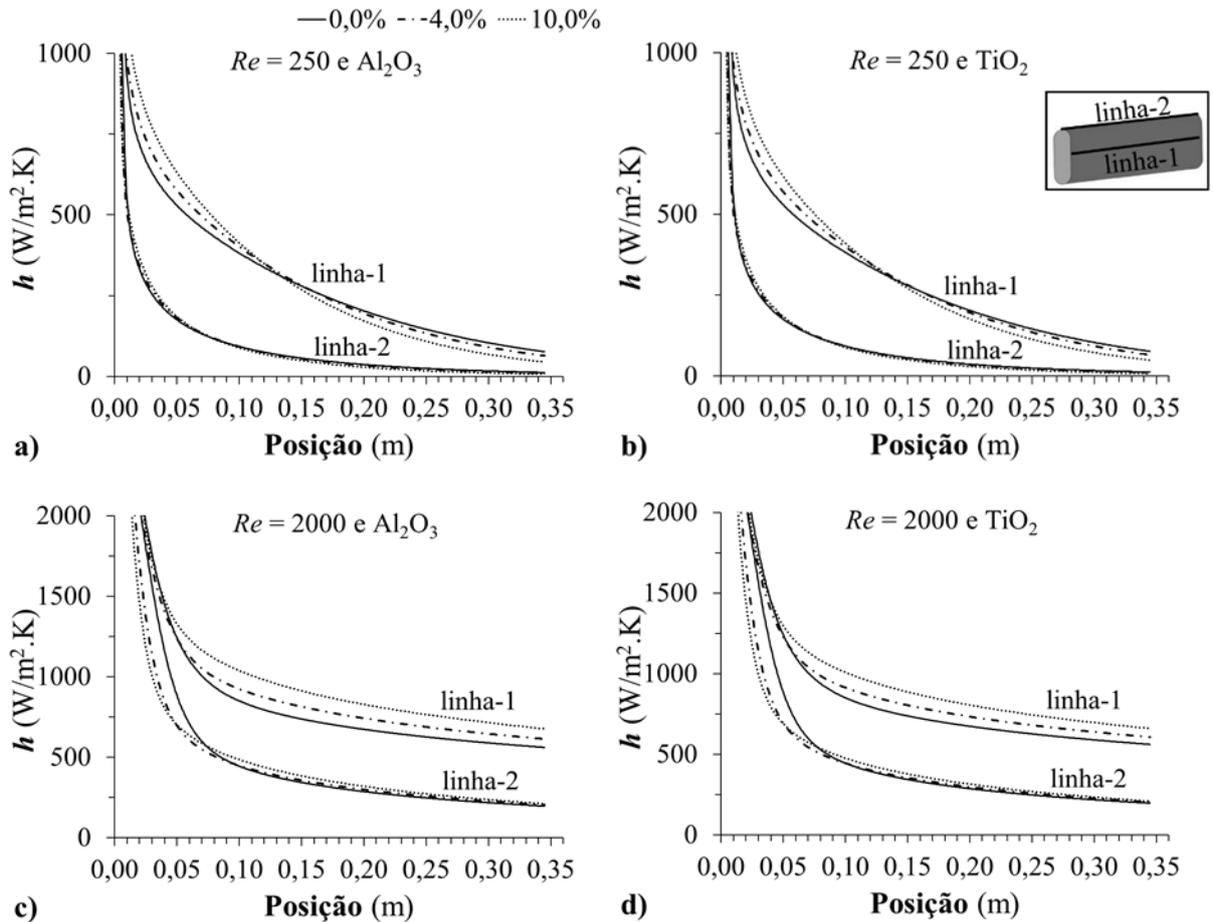
A Figura 5.9 mostra o coeficiente de transferência de calor local ( $h$ ) ao longo do tubo, em função da concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , para as propriedades dependentes da temperatura. Relembrar só que na figura apenas mostra os valores até  $h = 1000 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para  $Re = 250$  e até  $h = 2000 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para  $Re = 2000$ , pois apesar de atingir valores superiores, desta maneira torna mais fácil a perceção do seu comportamento. Em todas estas situações o  $h$  diminui ao longo do tubo para a linha-1 e linha-2.

Quando  $Re = 250$  e para a alumina a diminuição de  $h$  ao longo da linha-1, é máxima para a concentração de 10,0 %, com uma variação de  $3789,66 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . Nas mesmas condições mas com a concentração de 10,0 % de dióxido de titânio, a variação entre a entrada e a saída é de  $3634,4 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . Na linha-2 o efeito da concentração de nanopartículas no  $h$  é menor do que para a linha-1, atingindo valores próximos do zero, devido ao abaixamento da temperatura até próximo da temperatura da condição de fronteira. Para a concentração de 10,0 % a diferença é de  $3711,9 \text{ W/m}^2.\text{K}$  e de  $3564,8 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , para alumina e dióxido de titânio, respetivamente. Também aqui, tal como acontece para as propriedades independentes da temperatura, a concentração tem efeitos opostos ao longo das linhas, onde o  $h$  diminui com a concentração no início e final do tubo, existindo uma zona intermédia, zona essa bem menor na linha-2 do que na linha-1, onde o comportamento é o oposto.

Quando  $Re = 2000$ , a diferença máxima do  $h$  entre a entrada e a saída ocorre na linha-2, para a concentração 10,0 %, com variações de  $3745,78 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para a alumina e  $3582,98 \text{ W/m}^2.\text{K}$  para dióxido de titânio. Salienta-se também a mudança de comportamento do  $h$  ao longo das linhas, tendo no início e no fim do tubo, maiores valores de  $h$  para menores concentrações, mas em algum momento entre estes, esse comportamento é invertido.

É interessante notar que com  $Re = 250$ , à saída do tubo, quanto maior a concentração menor é o valor de  $h$ . Algo que acontece de forma inversa para  $Re = 2000$ , na saída do tubo quanto maior a concentração maior é o valor de  $h$ .

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, observa-se que no caso agora em estudo o  $h$  atinge valores mais altos, tanto na entrada como na saída do tubo, quer para  $Re = 250$  como para  $Re = 2000$ .



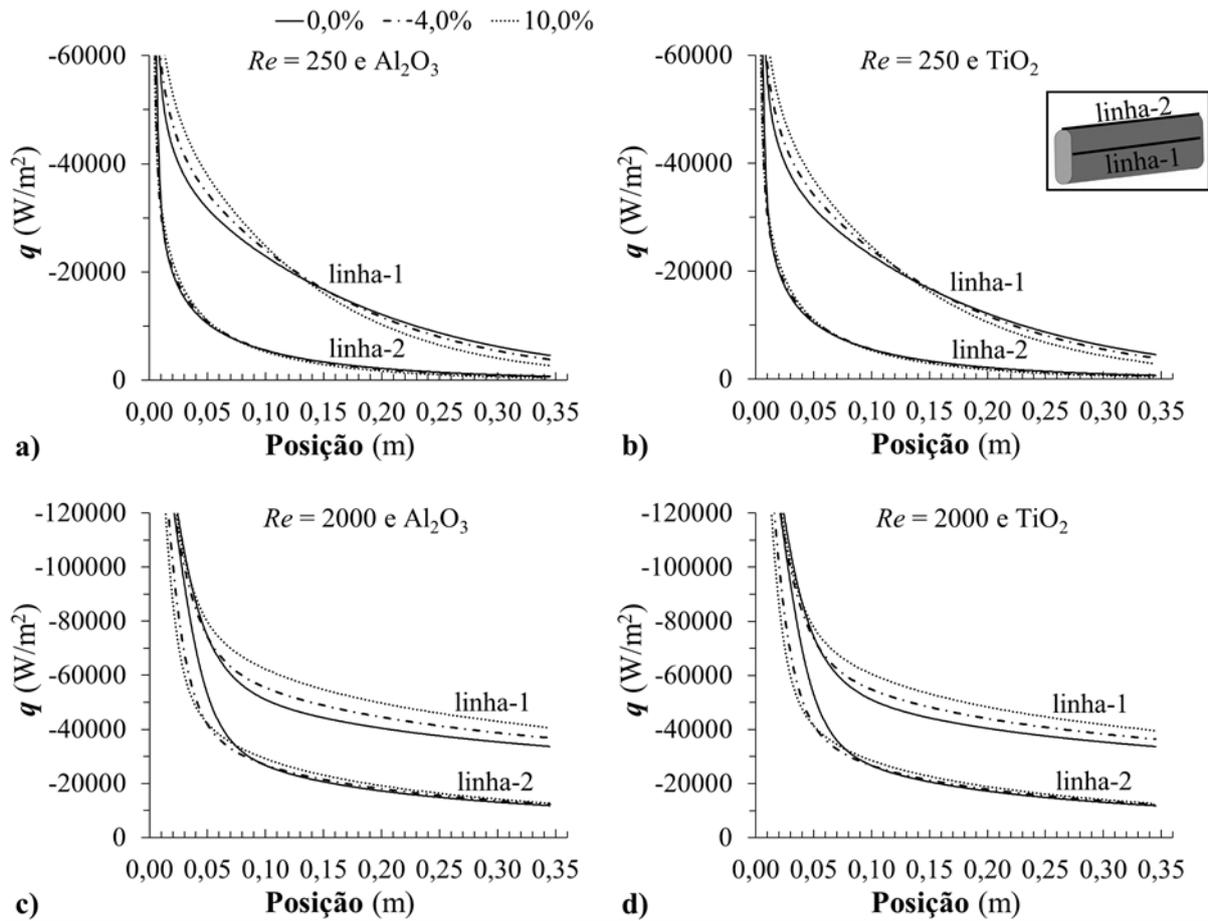
**Figura 5.9** - Coeficiente de transferência de calor  $h$  ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função das concentrações, para o caso em que as propriedades dependem da temperatura: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Na Figura 5.10 está representado o fluxo de calor  $q$  ao longo do tubo, em função da concentração de alumina e de dióxido de titânio, para as propriedades dependentes da temperatura. Tal como esperado, também tem um comportamento qualitativamente idêntico ao do coeficiente de transferência de calor  $h$ . Notando que aqui também os valores máximos de  $q$  presentes nas figuras não são os valores máximos atingidos, sendo ajustada a imagem para uma escala de modo a visualizar melhor o comportamento de  $q$ .

Para  $Re = 250$ , a variação máxima de  $q$  ao longo do tubo ocorre para a concentração de 10,0 % de alumina, com variações de  $227 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1, e de  $222 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2. Para a concentração de 10,0 % de dióxido de titânio, a variação máxima é de  $218 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1 e de  $\sim 214 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2.

Para  $Re = 2000$ , a diferença máxima do  $q$  entre a entrada e a saída do tubo ocorre para a concentração de 10,0 % de alumina com variações de  $203 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1, e de  $224 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2. Enquanto para o dióxido de titânio as variações são de  $194 \text{ kW/m}^2$  para a linha-1 e de  $214 \text{ kW/m}^2$  para a linha-2.

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, observa-se, em coerência com o  $h$ , que no caso agora em estudo atingem-se valores mais altos, quer na entrada como na saída do tubo, tanto para  $Re = 250$  como para  $Re = 2000$ . Com isto, também se verificou que entre os valores de entrada e de saída existe uma diferença maior quando as propriedades são dependentes da temperatura, donde se infere que houve uma maior taxa de transferência de calor.



**Figura 5.10** - Fluxo de calor  $q$  ao longo do tubo (segundo as linhas definidas nas diferentes secções da parede do tubo), em função das concentrações, para o caso em que as propriedades dependem da temperatura: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

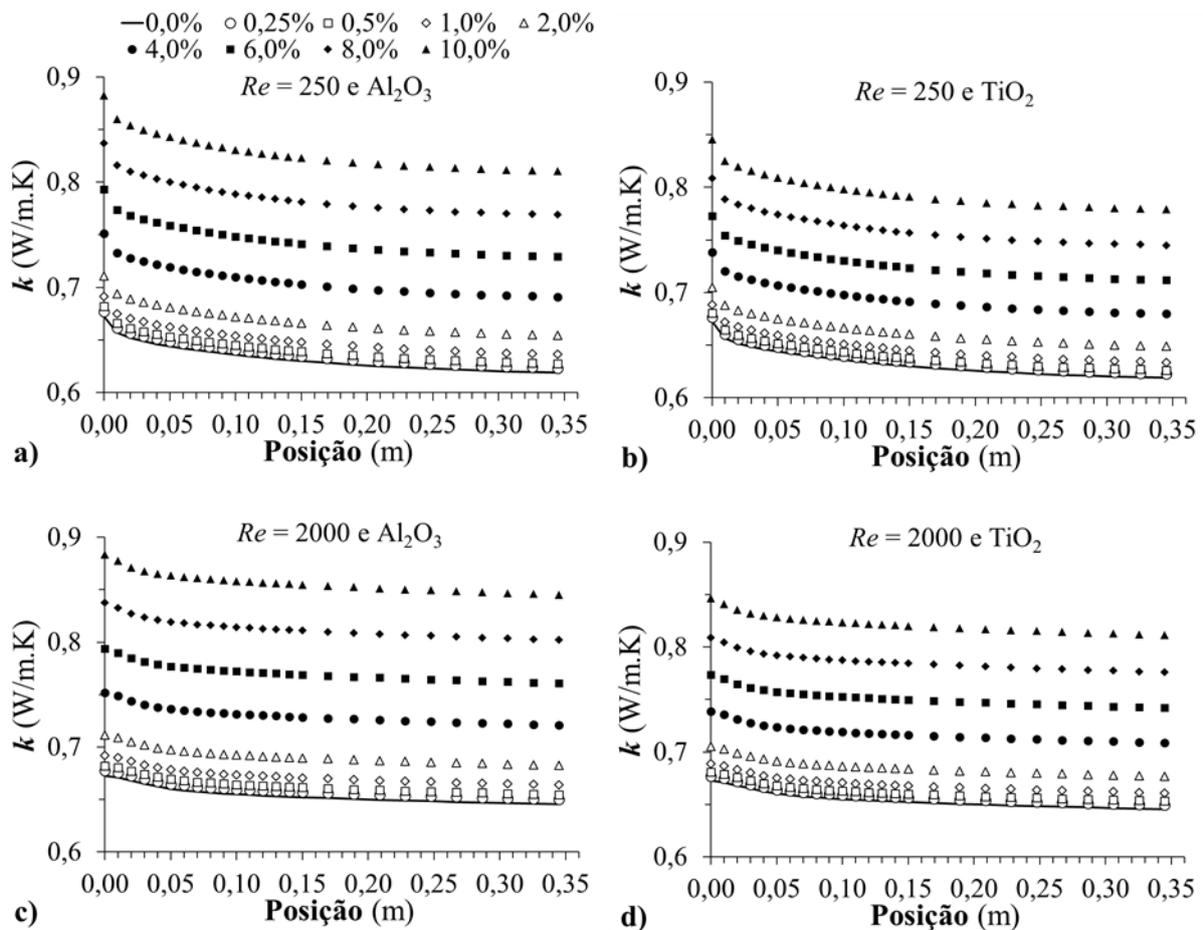
Para este caso, das propriedades dependentes da temperatura é interessante mostrar a variação da condutividade térmica  $k$  ao longo do tubo. Na Figura 5.11 observa-se que, em geral, o  $k$  diminui ao longo do tubo, verificando-se que a variação máxima entre a entrada e saída do tubo ocorre para a concentração de 10,0 % e que aumenta com a concentração. Esta variação está relacionada com o aumento da variação da temperatura ao longo do tubo, pois tal como se infere da equação (2.31) quanto maior a diferença de temperatura menor será o  $k$ .

O aumento da concentração quer de alumina quer de dióxido de titânio, leva a um aumento dos valores de  $k$ , podendo-se esclarecer este facto analisando a Tabela 4.2 onde se verifica que  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$  tem maior  $k$  que a água, logo com o aumento da concentração também ocorre o aumento da condutividade térmica  $k$  do nanofluido correspondente. Isto revela-se vantajoso, em termos de transferência de calor, tornando o fluido mais eficiente na condução de calor.

Para  $Re = 250$ , o valor máximo de  $k$  ocorre na entrada do tubo e é de  $0,6722 \text{ W/m.K}$  para a concentração de  $0,0 \%$ , enquanto para a concentração de  $10,0 \%$  de alumina e dióxido titânio é de  $0,8825 \text{ W/m.K}$  e  $0,8456 \text{ W/m.K}$ , respetivamente. Na saída o valor de  $k$ , para a concentração de  $0,0 \%$  é  $0,6188 \text{ W/m.K}$  e, para  $10,0 \%$  é  $0,8107 \text{ W/m.K}$  com nanopartículas de alumina e  $0,7794 \text{ W/m.K}$  com nanopartículas de dióxido de titânio.

Para  $Re = 2000$  e com concentração  $0,0 \%$  tem-se  $0,6727 \text{ W/m.K}$  e  $0,6455 \text{ W/m.K}$ , na entrada e saída, respetivamente. Quando a concentração é de  $10,0 \%$ , com nanopartículas de alumina observou-se à entrada  $0,8835 \text{ W/m.K}$  e à saída  $0,8452 \text{ W/m.K}$ . Com nanopartículas de dióxido de titânio os valores foram  $0,8464 \text{ W/m.K}$  e  $0,8115 \text{ W/m.K}$ , respetivamente. Sendo estas diferenças maior do que para  $Re = 250$ .

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, verifica-se que os valores são maiores para o caso da condutividade térmica dependente da temperatura ou seja, a temperatura influencia o  $k$  ao longo do tubo.



**Figura 5.11** - Condutividade térmica  $k$  ao longo do tubo, em função das concentrações: a)  $Re = 250$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $\text{TiO}_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $\text{TiO}_2$ .

Outra propriedade analisada para este caso, é o calor específico  $c_p$ , representado na Figura 5.12. Este mantém-se praticamente constante ao longo do tubo, revelando assim que a condição de as propriedades variarem com a temperatura não tem muita influência sobre o  $c_p$  ao longo do tubo, algo compreensível uma vez que o  $c_p$  é uma característica inerente ao fluido e não depende de fatores envolvidos no escoamento ao longo do tubo, apenas da sua massa e da capacidade térmica (equação (2.32)) que praticamente se mantém ao longo do tubo. Por outro lado o  $c_p$  diminui com o aumento da concentração quer de alumina quer de dióxido de titânio, tal situação era esperada, dado que o  $c_p$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e de  $\text{TiO}_2$  é menor do que o da água (Tabela 4.2), logo se a concentração das nanopartículas aumenta a tendência é o  $c_p$  da mistura diminuir. Assim, podemos inferir que em termos apenas de aumento de transferência de calor, o aumento da concentração de nanopartículas pode ser desvantajoso pois o calor específico diminui, isso indica segundo a definição de calor específico, que a energia necessária para diminuir 1 grau é menor, logo associado a essa energia também garante uma menor transferência de calor.

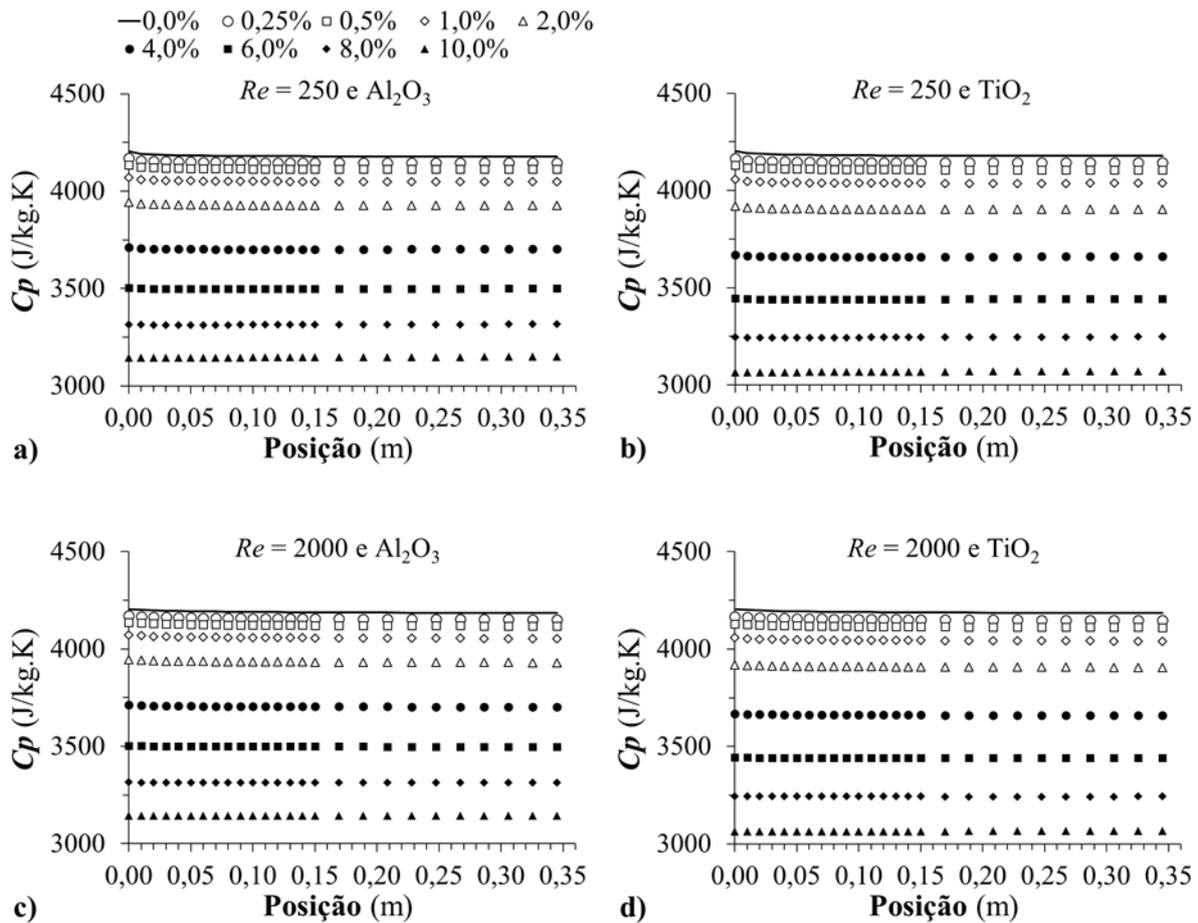
Para  $Re = 250$ , o valor de  $c_p$  para concentração de 0,0 % mantém-se aproximadamente em 4180 J/kg.K ao longo do tubo. Para concentrações de 10,0 % os valores rondam os 3150 J/kg.K e 3067 J/kg.K, para alumina e dióxido de titânio, respetivamente. Obtendo assim uma diminuição entre as concentrações de 0,0 e 10,0 % de  $\sim 1000$  J/kg.K com alumina e  $\sim 1100$  J/kg.K com dióxido de titânio.

Para  $Re = 2000$  e concentração de 0,0 % tem-se valores à volta dos 4190 J/kg.K ao longo do tubo. Para a concentração de 10,0 % de alumina  $c_p$  ronda os 3144 J/kg.K, enquanto com 10,0 % de dióxido de titânio este ronda o valor de 3065 J/kg.K. Ou seja, as diferenças entre as concentrações permanecem praticamente iguais. Assim a variação de  $Re$  tem pouco impacto no calor específico, registando-se um pequeno aumento de  $c_p$  com o aumento de  $Re$ .

Recorrendo à definição física de calor específico, o nanofluido de água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  precisa de receber um pouco mais de calor do que o nanofluido de água/ $\text{TiO}_2$  para ocorrer a mesma variação térmica do nanofluido. Algo que poderá ser vantajoso na refrigeração do automóvel.

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, também para o caso das propriedades dependentes da temperatura os valores de  $c_p$  são quase

constantes ao longo do tubo, sendo maiores mas muito ligeiramente ( $\sim 1 \text{ J/kg.K}$ ), do que o valor de entrada imposto pela condição inicial quando as propriedades são independentes da temperatura (Tabelas 4.1).



**Figura 5.12** - Calor específico ao longo do tubo, em função das concentrações: a)  $Re = 250$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $\text{TiO}_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $\text{TiO}_2$ .

A Figura 5.13 mostra evolução da viscosidade  $\mu$  ao longo do tubo. Para esta situação é mais evidente a influência da dependência da temperatura na viscosidade, aumentando o seu valor ao longo do tubo. Percebe-se também que  $\mu$  aumenta com a concentração de nanopartículas, podendo isto ser uma desvantagem, uma vez que o aumento da viscosidade dificulta a transferência térmica por convecção. É então necessário analisar se todos os outros fatores compensam este.

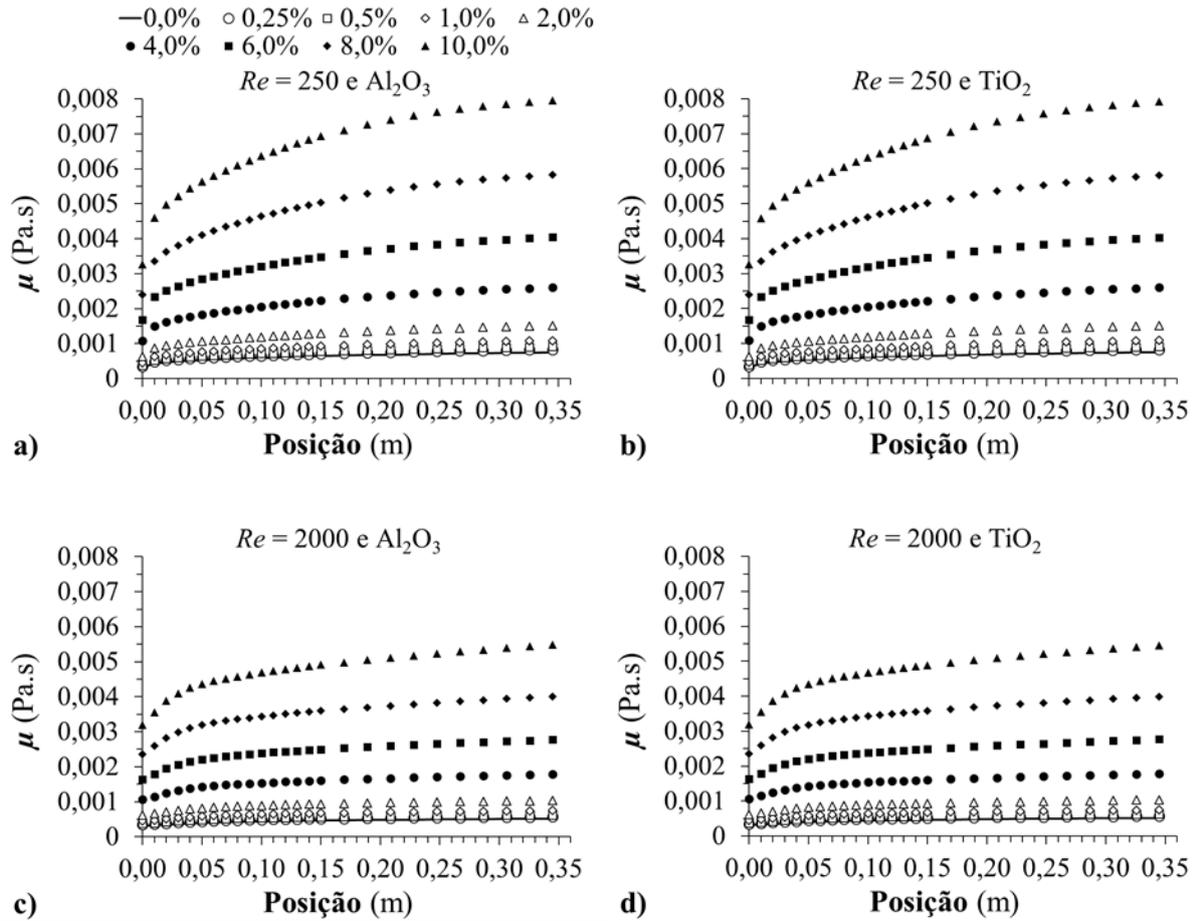
Para  $Re = 250$  e concentração de 0,0 % a viscosidade varia de 0,000457 a 0,001087 Pa.s, entre entrada e saída do tubo. Os valores máximos da viscosidade ocorrem para a concentração

de nanopartículas 10,0 % à saída do tubo, com 0,007959 Pa.s para alumina e 0,007929 Pa.s para o dióxido de titânio. À entrada do tubo tem-se 0,003268 Pa.s e 0,003265 Pa.s, respetivamente. Ou seja, existe um aumento significativo da viscosidade entre as concentrações 0,0 % e 10,0 %.

Com  $Re = 2000$  e para a alumina, registam-se valores máximos para concentração de 10,0 % à saída do tubo, de 0,005492 Pa.s, enquanto à entrada tem-se 0,003193 Pa.s. Para a mesma concentração mas de dióxido de titânio, os valores são, à saída do tubo 0,005461 Pa.s, e tem o mesmo valor que a alumina na entrada 0,003193 Pa.s, uma vez que a viscosidade é dada pela equação (4.2), ou seja, depende apenas da concentração de nanopartículas e da temperatura (na entrada a temperatura e a concentração é a mesma para os dois nanofluidos).

Daqui podemos concluir que de facto o aumento de  $Re$ , de 250 para 2000, tem alguma influência na viscosidade, baixando o valor desta, isto parece indicar que em princípio poderia ser vantajoso para a transferência de calor ter um maior  $Re$  uma vez que quanto menor a viscosidade maior será a transferência de calor por convecção. Outra observação é a pouca diferença entre os valores da viscosidade quando usamos nanopartículas de alumina ou de dióxido de titânio.

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, temos valores menores para a viscosidade na situação das propriedades dependentes da temperatura, uma vez a temperatura só interfere na viscosidade para o fluido base, onde podemos ver pelas Tabelas 4.1 e 4.2 que, dada as condições de entrada apresentadas para cada caso, a viscosidade à entrada é menor no caso das propriedades dependentes da temperatura.



**Figura 5.13** - Viscosidade ao longo do tubo, em função das concentrações: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

No que diz respeito ao número de Prandtl  $Pr$ , apresentado na Figura 5.14, este aumenta ao longo do tubo. Da equação (2.33), sabemos que  $Pr$  é diretamente proporcional à viscosidade e ao calor específico. Da Figura 5.12 verifica-se que o calor específico deverá ter pouca influência na variação de  $Pr$ . Por outro lado, o aumento da viscosidade ao longo do tubo é superior à diminuição da condutividade térmica  $k$ , este último inversamente proporcional a  $Pr$ . Recorrendo a um exemplo, para  $Re = 2000$ , com alumina houve um aumento de 72 % na saída em relação à entrada, da viscosidade. Enquanto para a mesma situação anterior o aumento de  $k$  foi apenas de 4 %. Assim, o aumento da concentração de alumina ou de dióxido de titânio no nanofluido, também origina um aumento de  $Pr$ . Ou seja, analisando a equação (2.33) e as Figuras 5.11 a 5.13, verifica-se que o aumento de  $k$  e a diminuição de  $c_p$ , é compensado pelo aumento da viscosidade, com a concentração. Tendo em conta que  $Pr$  dá a relação entre a difusão de quantidade de movimento e a difusão de quantidade de calor dentro do próprio fluido, a eficiência da transferência de calor está associada com esta relação. Dito isto e tendo

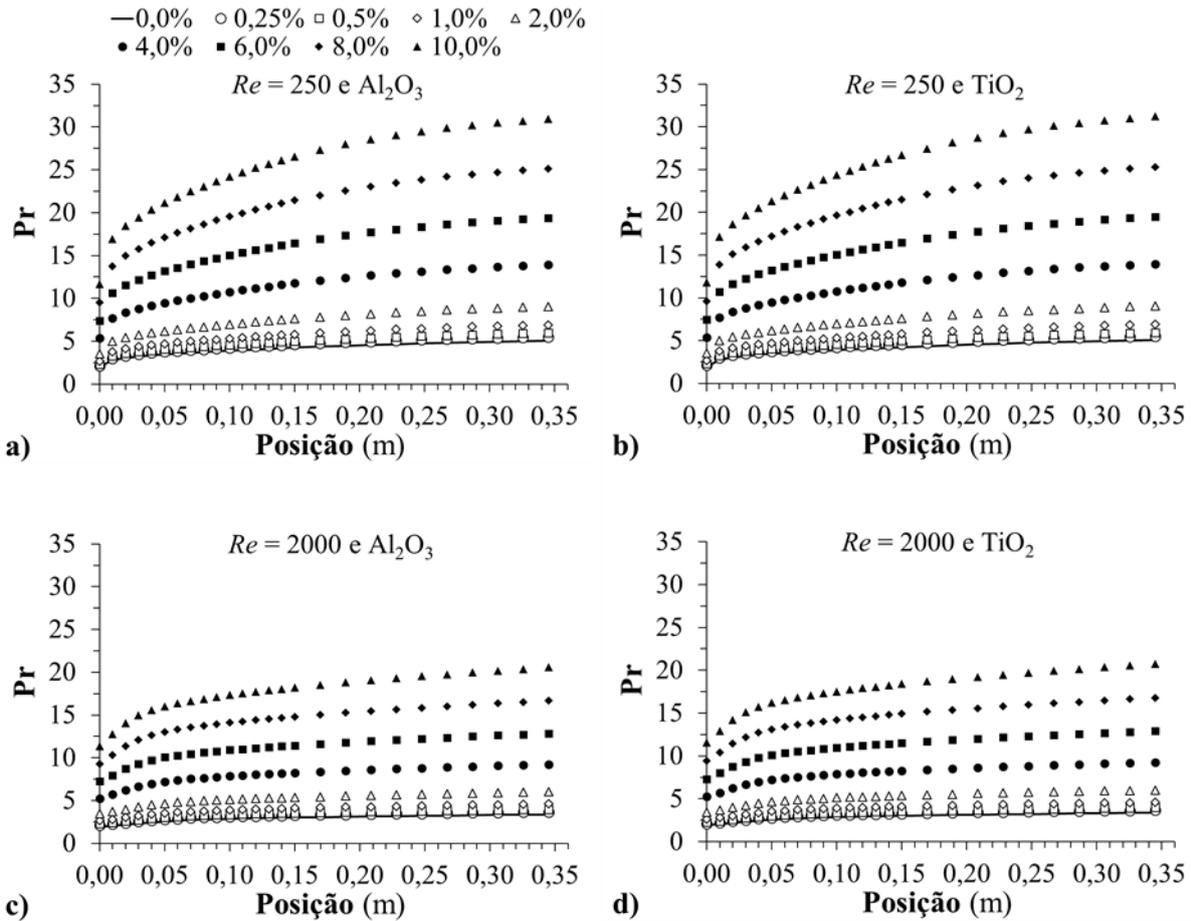
também em conta a equação (2.33), este parâmetro parece não ser favorável à transferência de calor, daí a necessidade de averiguar a inter-relação entre os diferentes parâmetros a fim de verificar se há compensações entre eles.

Para  $Re = 250$ , o valor máximo de  $Pr$  para a concentração de 0,0 % é de  $\sim 5$ , obtido à saída do tubo. Com concentração de 10,0 % à saída do tubo é de 30,92 para nanopartículas de alumina, e de 31,24 para nanopartículas de dióxido de titânio.

Para  $Re = 2000$  e concentração de 0,0% o valor máximo de  $Pr$  à saída é de  $\sim 3,38$ . Para a concentração de 10,0% à saída do tubo, é aproximadamente 20,57 para a alumina e 20,76 para o dióxido de titânio. Ou seja, temos valores menores de  $Pr$  para  $Re = 2000$  do que para  $Re = 250$ , podendo ser uma vantagem em relação a casos onde  $Pr$  seja mais elevado uma vez que favorecem a transferência de calor por condução.

Podemos então inferir a partir da Figura 5.14, que existe uma influência significativa da variação da temperatura no  $Pr$ . Havendo também uma influência com o aumento de  $Re$ . No entanto comparando os nanofluidos em estudo, estes diferem pouco. Por exemplo, para a concentração de nanopartículas 10,0 % na saída do tubo as diferenças são de  $\sim 1,04$  % para  $Re = 250$  e de 0,92 % para  $Re = 2000$  do dióxido de titânio relativamente à alumina.

Comparando com o caso em que as propriedades são independentes da temperatura, verifica-se que os valores de  $Pr$  são menores quando as propriedades são dependentes da temperatura, como consequência da influência da menor diminuição da temperatura ao longo do tubo na combinação dos parâmetros  $c_p$ ,  $\mu$  e  $k$ .



**Figura 5.14** - Número de Prandtl  $Pr$  ao longo do tubo, em função das concentrações: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

Na Figura 5.15 está representado o número de Nusselt  $Nu$ , para o caso em que as propriedades são dependentes da temperatura. Tal como para as propriedades independentes da temperatura, Figura 5.4,  $Nu$  diminui ao longo do tubo para ambas as linhas, ocorrendo maior diminuição ao longo da linha-2. Este comportamento é mais acentuado para as maiores concentrações de alumina e de dióxido de titânio.

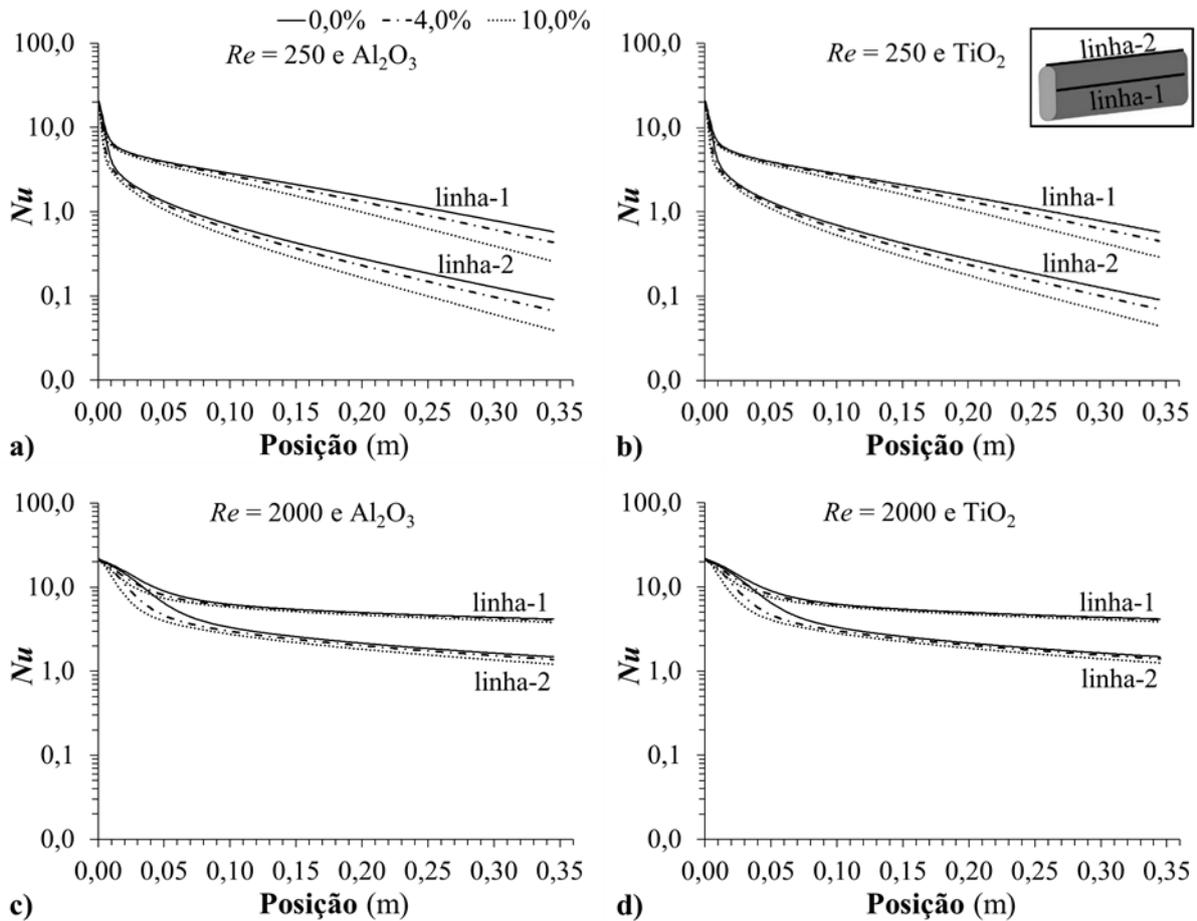
Quando  $Re = 250$ , em relação à linha-1, é nesta que se verifica o número máximo de  $Nu$  de 20,82, para a concentração de 0,0 % à entrada do tubo. Na saída do tubo obteve-se o valor 0,57. Para a concentração de 10,0 % de alumina apesar de  $Nu$  à entrada ser ligeiramente menor em relação a ter apenas água, 20,36, à saída obtém-se  $\sim 0,25$ . Já com concentração de 10,0 % de dióxido de titânio resultou  $Nu = 20,41$  à entrada e à saída obteve-se  $\sim 0,29$ . Para a linha-2, temos para 0,0 % os valores de 20,19 e 0,09 à entrada e saída do tubo, respetivamente. E para o caso em que a concentração é 10,0 % temos à entrada  $\sim 19,75$  para alumina e  $\sim 19,80$  para o

dióxido de titânio, verificando-se o menor valor à saída do tubo, com 0,039 para alumina e 0,045 para dióxido de titânio.

Quando  $Re = 2000$ , na linha-1, obtém-se o valor máximo de  $Nu$  de 21,62, para a concentração de 0,0 % à entrada do tubo. Na saída do tubo obteve-se 4,16. Para a concentração de 10,0 % de alumina na entrada temos quase 21 e à saída obteve-se  $\sim 3,82$ . Com o dióxido de titânio e concentração de 10,0 %, à entrada o valor é de 21,58 e à saída  $\sim 3,88$ . Para a linha-2 os valores na entrada são muito próximos do que acontece na linha-1, verificando-se uma maior diferença nos valores à saída do tubo, com 1,48 para 0,0 % de concentração, 1,22 para 10,0 % de alumina e 1,25 com 10,0 % de dióxido de titânio.

Por outro lado, quando  $Re = 2000$  o valor de  $Nu$  cresce em relação ao valor obtido para  $Re = 250$ . As diferenças obtidas entre os dois nanofluidos usados neste estudo são mais significativas para o  $Re$  mais baixo. Por exemplo, para a concentração de nanopartículas 10,0 % na saída do tubo a diferenças são de 16 % para  $Re = 250$  e de 1,57 % para  $Re = 2000$  do dióxido de titânio relativamente à alumina.

O mais relevante, comparando com as propriedades independentes da temperatura, é que para o caso das propriedades dependentes da temperatura o  $Nu$  atinge valores menores, aproximando-se de zero ao longo da parede do tubo (linha-2) à medida que se aproxima da saída.



**Figura 5.15** - Número de Nusselt  $Nu$  ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração: a)  $Re = 250$  e  $Al_2O_3$ ; b)  $Re = 250$  e  $TiO_2$ ; c)  $Re = 2000$  e  $Al_2O_3$ ; d)  $Re = 2000$  e  $TiO_2$ .

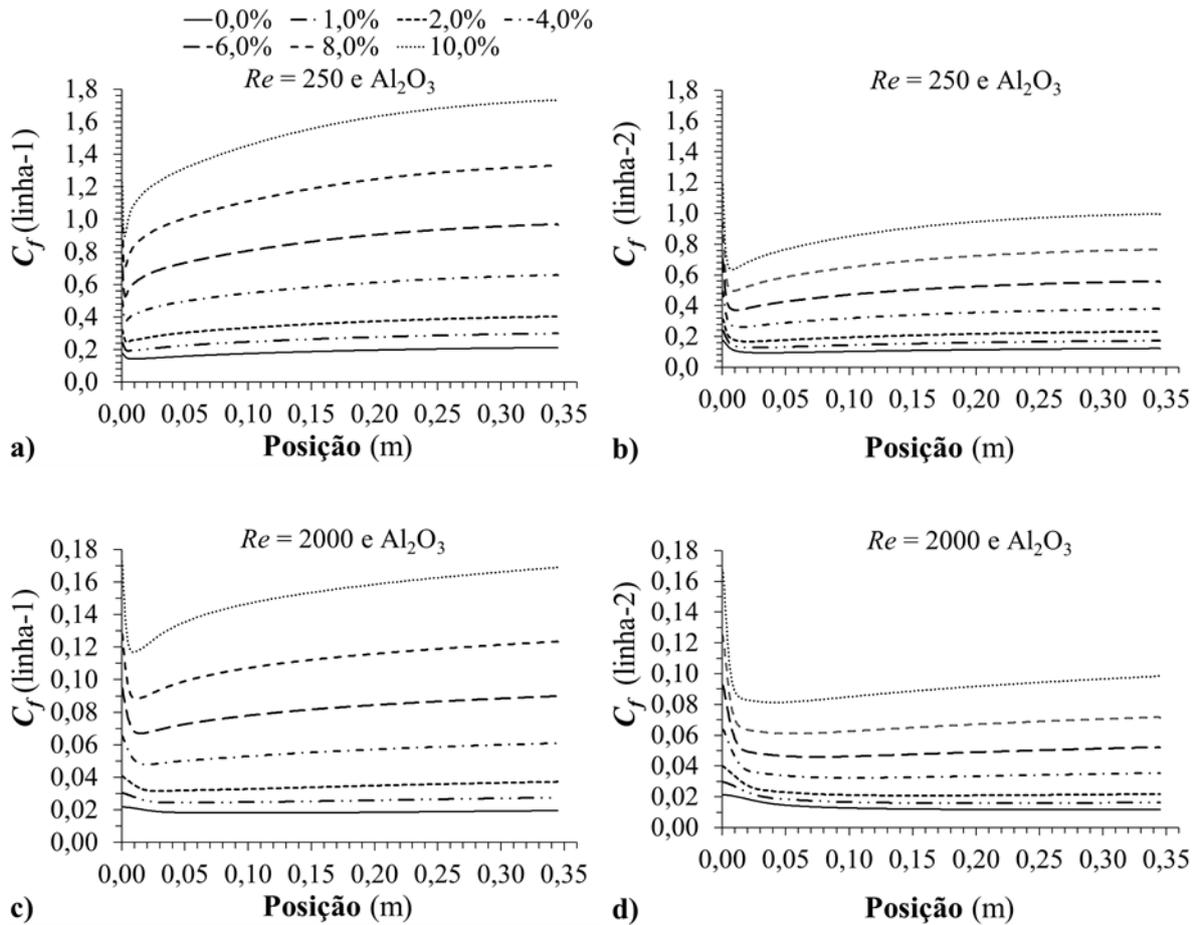
O coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo da parede do tubo, para o caso das propriedades dependentes da temperatura, com concentrações de alumina, é mostrado na Figura 5.16. Mais uma vez o comportamento ao longo de ambas as linhas é qualitativamente semelhante. Ao contrário do que acontece na Figura 5.5 onde o  $C_f$  é praticamente constante a partir dos 0,03 m, aqui  $C_f$  vai aumentando ao longo do tubo. Algo esperado uma vez que neste caso as propriedades variam com a temperatura, logo há uma influência nos parâmetros relacionados com o  $C_f$ , equações (2.17) a (2.20), como a massa volúmica e a viscosidade. Por outro lado, os valores de  $C_f$  vão aumentando também com o aumento da concentração de nanopartículas de alumina.

Para  $Re = 250$ , verificou-se para a concentração de 0,0 %, valores de 0,2120 e 0,1218 à saída, na linha-1 e linha-2, respetivamente. Para a concentração de 10,0 %, na mesma situação obteve-se 1,72 e 0,99, respetivamente.

Para  $Re = 2000$ , à saída do tubo os valores de  $C_f$  foram 0,20 e 0,11, na linha-1 e linha-2 respectivamente, com concentração 0,0 %. Na mesma situação, para a concentração de 10,0 % obteve-se 0,17 e 0,10 respectivamente.

Daqui conclui-se que o uso de escoamentos com  $Re$  mais elevados ( $Re = 2000$ ) têm influência considerável nos valores de  $C_f$ , baixando-os bastante, como por exemplo, com a concentração de 10,0 % existe uma diferença de 90 % com  $Re = 2000$  em relação a  $Re = 250$ , na saída do tubo ao longo da linha-1. Também observa-se que os valores de  $C_f$  dependem significativamente da secção do tubo, uma vez que ao longo da linha-1 (secção curva) os valores são maiores do que ao longo da linha-2 (secção reta).

Comparado com as propriedades independentes da temperatura, para o caso das propriedades dependentes da temperatura o valor de  $C_f$  atinge valores maiores, o que pode ser explicado pela diminuição da viscosidade com a temperatura uma vez que a diferença de temperatura entre o nanofluido e a parede do tubo é maior para o caso das propriedades dependentes da temperatura.

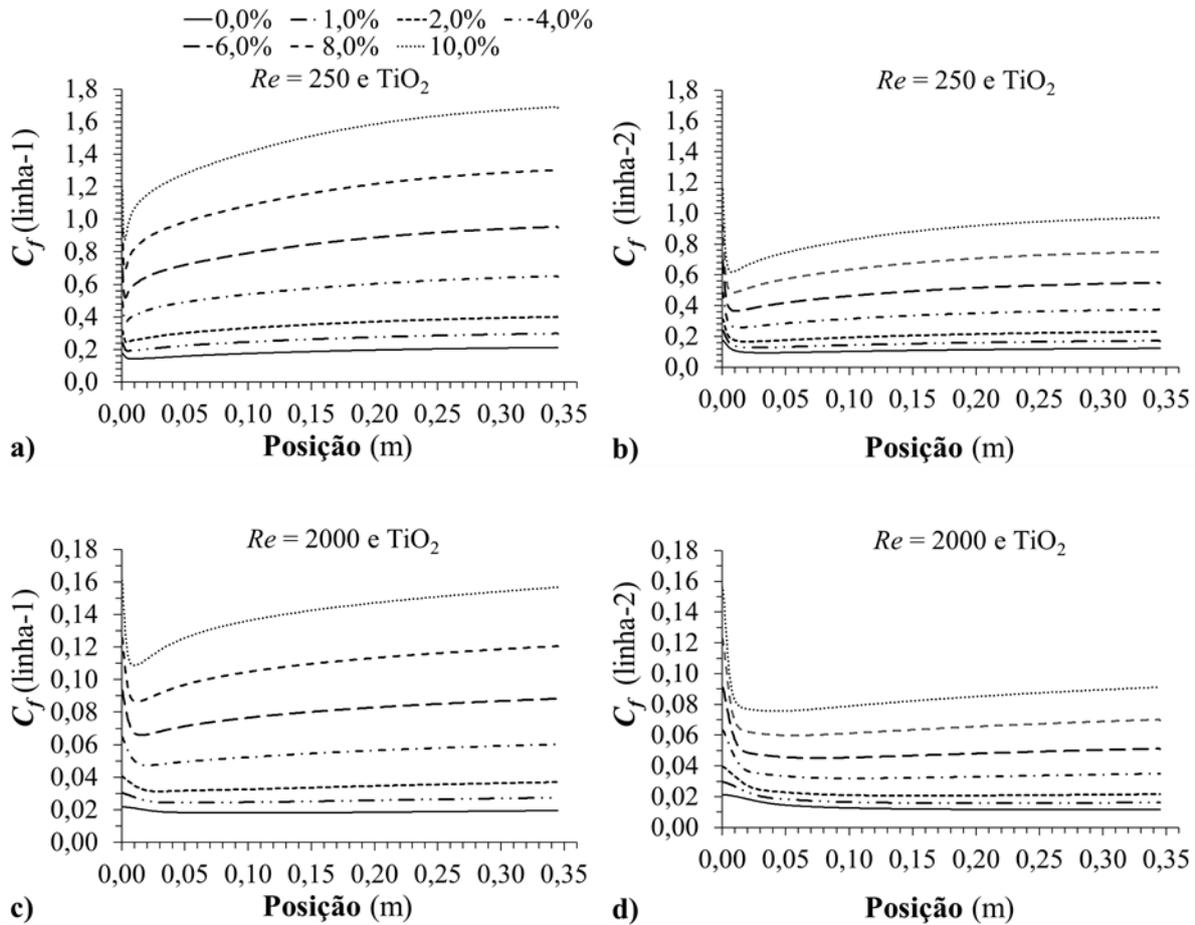


**Figura 5.16** - Coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração de  $Al_2O_3$ : a)  $Re = 250$  ao longo da linha-1; b)  $Re = 250$  ao longo da linha-2; c)  $Re = 2000$  ao longo da linha-1; d)  $Re = 2000$  ao longo da linha-2.

Na Figura 5.17, também está representado o  $C_f$ , mas agora para o dióxido de titânio. O comportamento é qualitativamente igual ao que se observa para a alumina, verificando-se as mesmas alterações em todas as situações analisadas.

Com isto, referimos apenas que para a concentração de dióxido de titânio de 10,0 % quando  $Re = 250$ , à saída do tubo, obteve-se 1,68 e 0,97, respectivamente para a linha-1 e linha-2.

Para  $Re = 2000$  e para a concentração de 10,0 %, na linha-1 obteve-se 0,160 e 0,156 na entrada e na saída, respectivamente. Enquanto na linha-2, pela mesma ordem tem-se 0,156 e 0,090.



**Figura 5.17** - Coeficiente de atrito  $C_f$  ao longo do tubo, com as propriedades dependentes da temperatura, em função da concentração de  $\text{TiO}_2$ : a)  $Re = 250$  ao longo da linha-1; b)  $Re = 250$  ao longo da linha-2; c)  $Re = 2000$  ao longo da linha-1; d)  $Re = 2000$  ao longo da linha-2.

Também neste caso das propriedades dependentes da temperatura, foram elaboradas tabelas, resumindo todos os parâmetros estudados, apresentando os valores médios. Tendo em conta que todos os parâmetros são obtidos de modo semelhante ao apresentado nas Tabelas 5.1 a 5.4.

Com isto, podemos dizer que o comportamento dos parâmetros com a concentração de nanopartículas é semelhante. Ou seja, também aqui o aumento de concentração quer de alumina (Tabelas 5.5 e 5.6) quer de dióxido de titânio (Tabelas 5.7 e 5.8), faz aumentar os parâmetros  $\Delta p$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $k$ ,  $Pr$ ,  $C_f$ ,  $q$  e  $h$  e  $P$ . Comportamento oposto é observado para o  $Re$ ,  $T$ ,  $c_p$  e  $Nu$ , isto é diminuem com o aumento da concentração. A principal diferença entre estas tabelas está nos valores de  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ , bem como  $Pr$  e  $Nu$  que estão associados, quando as propriedades são independentes da temperatura eles são constantes ao longo do tubo quer para  $Re = 250$  e para  $Re = 2000$ . Algo que no caso das propriedades dependentes da temperatura não se verifica, pois

estas propriedades variam com a temperatura. Mais uma vez também que se torna a observar uma pequena variação da temperatura com o aumento da concentração, associado ao erro numérico, no entanto o erro do caso mais extremo não chega a ultrapassar 1 % em relação a ter apenas água (0,0 %).

**Tabela 5.5** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada  $Re = 250$  ( $v = 0,0172$  m/s).

| Nanofluido                  | água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ (propriedades dependentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)   | 0       | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 127,42  | 116,45  | 90,43   | 67,03   | 40,93   | 27,70   | 20,12   | 15,38   |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 3,34    | 3,68    | 4,85    | 6,73    | 11,65   | 18,13   | 26,21   | 35,90   |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 989,76  | 997,02  | 1018,78 | 1047,80 | 1105,84 | 1163,86 | 1221,88 | 1279,87 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,0173  | 0,0173  | 0,0173  | 0,0173  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  |
| $T$ (K)                     |   | 317,14  | 317,08  | 316,87  | 316,59  | 315,99  | 315,39  | 314,80  | 314,23  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,6312  | 0,6958  | 0,9160  | 1,2717  | 2,2010  | 3,427   | 4,959   | 6,803   |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6317  | 0,6361  | 0,6495  | 0,6663  | 0,7050  | 0,7437  | 0,7840  | 0,8260  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4180,83 | 4147,67 | 4051,00 | 3928,35 | 3702,38 | 3498,95 | 3314,84 | 3147,42 |
| $Pr$                        |   | 4,20    | 4,56    | 5,74    | 7,67    | 11,62   | 16,21   | 21,07   | 26,05   |
| $C_f$                       |   | 0,1508  | 0,1648  | 0,2116  | 0,2847  | 0,4647  | 0,6851  | 0,9414  | 1,2296  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -13,232 | -13,239 | -13,260 | -13,287 | -13,336 | -13,373 | -13,398 | -13,411 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 220,54  | 220,65  | 221,00  | 221,46  | 222,27  | 222,89  | 223,31  | 223,53  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 1,64    | 1,63    | 1,60    | 1,56    | 1,48    | 1,40    | 1,33    | 1,27    |
| $P$ (mW)                    |   | 0,145   | 0,160   | 0,210   | 0,292   | 0,507   | 0,789   | 1,142   | 1,566   |
| $P_R$ (%)                   |   |         | 10,28   | 45,35   | 102,05  | 250,18  | 445,61  | 689,45  | 982,65  |

**Tabela 5.6** - Comparação de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada  $Re = 2000$  ( $v = 0,1376$  m/s).

| Nanofluido                  | água/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ (propriedades dependentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)   | 0,0     | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 1450,32 | 1325,05 | 1028,33 | 762,17  | 466,04  | 316,04  | 230,07  | 176,18  |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 22,35   | 24,32   | 31,04   | 41,97   | 70,72   | 108,83  | 156,44  | 213,72  |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 978,38  | 985,68  | 1007,57 | 1036,73 | 1095,04 | 1153,33 | 1211,61 | 1269,89 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,1416  | 0,1416  | 0,1415  | 0,1414  | 0,1412  | 0,1412  | 0,1411  | 0,1411  |
| $T$ (K)                     |   | 340,20  | 340,12  | 339,89  | 339,60  | 339,07  | 338,56  | 338,03  | 337,50  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,4470  | 0,4928  | 0,6487  | 0,8999  | 1,5530  | 2,4109  | 3,4786  | 4,7609  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6547  | 0,6593  | 0,6732  | 0,6921  | 0,7309  | 0,7714  | 0,8134  | 0,8572  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4189,72 | 4156,05 | 4057,97 | 3933,65 | 3704,89 | 3499,27 | 3313,44 | 3144,67 |
| $Pr$                        |   | 2,88    | 3,13    | 3,94    | 5,15    | 7,93    | 11,02   | 14,28   | 17,60   |
| $C_f$                       |   | 0,0161  | 0,0175  | 0,0219  | 0,0288  | 0,0458  | 0,0664  | 0,0904  | 0,1230  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -45,005 | -44,985 | -45,017 | -45,227 | -46,007 | -47,037 | -48,189 | -49,408 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 750,09  | 749,76  | 750,29  | 753,80  | 766,79  | 783,96  | 803,17  | 823,48  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 5,47    | 5,43    | 5,33    | 5,21    | 5,02    | 4,86    | 4,73    | 4,60    |
| $P$ (mW)                    |   | 7,902   | 8,595   | 10,963  | 14,814  | 24,943  | 38,366  | 55,139  | 75,321  |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 8,76    | 38,74   | 87,45   | 215,62  | 385,48  | 597,72  | 853,10  |

**Tabela 5.7** – Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/TiO<sub>2</sub> com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada  $Re = 250$  ( $v = 0,0172$  m/s).

| Nanofluido                  | água/TiO <sub>2</sub> (propriedades dependentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | TiO <sub>2</sub> (%)  | 0,0     | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 127,42  | 116,56  | 90,76   | 67,51   | 41,49   | 28,24   | 20,62   | 15,83   |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 3,34    | 3,67    | 4,84    | 6,72    | 11,63   | 18,08   | 26,11   | 35,75   |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 989,76  | 997,74  | 1021,71 | 1053,66 | 1117,56 | 1181,46 | 1245,35 | 1309,23 |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0174  | 0,0175  | 0,0175  |
| $T$ (K)                     |   | 317,14  | 317,08  | 316,91  | 316,67  | 316,15  | 315,63  | 315,11  | 314,60  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,6312  | 0,6956  | 0,9152  | 1,2693  | 2,1946  | 3,4129  | 4,9322  | 6,7591  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6316  | 0,6354  | 0,6467  | 0,6620  | 0,6933  | 0,7257  | 0,7591  | 0,7937  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4180,83 | 4144,32 | 4038,22 | 3904,27 | 3659,34 | 3440,91 | 3244,89 | 3068,00 |
| $Pr$                        |   | 4,20    | 4,56    | 5,74    | 7,52    | 11,64   | 16,26   | 21,18   | 26,25   |
| $C_f$                       |   | 0,1507  | 0,164   | 0,210   | 0,282   | 0,458   | 0,672   | 0,919   | 1,196   |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -13,232 | -13,235 | -13,246 | -13,262 | -13,288 | -13,307 | -13,317 | -13,317 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 220,54  | 220,59  | 220,78  | 221,03  | 221,47  | 221,79  | 221,95  | 221,96  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 1,64    | 1,62    | 1,60    | 1,56    | 1,49    | 1,43    | 1,36    | 1,30    |
| $P$ (mW)                    |   | 0,145   | 0,159   | 0,210   | 0,292   | 0,506   | 0,787   | 1,138   | 1,560   |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 10,26   | 45,28   | 101,88  | 249,60  | 444,31  | 687,03  | 978,69  |

**Tabela 5.8** - Comparação dos valores médios de vários parâmetros para diferentes concentrações do nanofluido de água/TiO<sub>2</sub> com as propriedades dependentes da temperatura calculadas à temperatura constante (363,15 K). Condição de entrada  $Re = 2000$  ( $v = 0,1376$  m/s).

| Nanofluido                  | Água/TiO <sub>2</sub> (propriedades dependentes da temperatura) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | TiO <sub>2</sub> (%)  | 0,0     | 0,25    | 1,0     | 2,0     | 4,0     | 6,0     | 8,0     | 10,0    |
| $Re$                        |   | 1450,32 | 1326,23 | 1031,93 | 767,36  | 472,09  | 321,93  | 235,55  | 181,23  |
| $\Delta p$ (Pa)             |   | 22,35   | 24,31   | 31,03   | 41,95   | 70,64   | 108,59  | 155,95  | 212,86  |
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |   | 978,38  | 986,40  | 1010,49 | 1042,59 | 1106,76 | 1170,91 | 1235,06 | 1299,2  |
| $v$ (m/s)                   |   | 0,1416  | 0,1416  | 0,1415  | 0,1414  | 0,1413  | 0,1412  | 0,1412  | 0,1412  |
| $T$ (K)                     |   | 340,20  | 340,13  | 339,92  | 339,68  | 339,22  | 338,77  | 338,32  | 337,86  |
| $\mu$ (mPa.s)               |   | 0,4470  | 0,4927  | 0,6483  | 0,8989  | 1,5498  | 2,4036  | 3,4644  | 4,7367  |
| $k$ (W/m.K)                 |   | 0,6547  | 0,6585  | 0,6702  | 0,6860  | 0,7185  | 0,7520  | 0,7867  | 0,8225  |
| $c_p$ (J/kg.K)              |   | 4189,72 | 4152,66 | 4045,04 | 3909,29 | 3661,43 | 3440,75 | 3242,99 | 3064,77 |
| $Pr$                        |   | 2,88    | 3,12    | 3,94    | 5,15    | 7,95    | 11,07   | 14,38   | 17,78   |
| $C_f$                       |   | 0,0161  | 0,0175  | 0,0219  | 0,0287  | 0,0452  | 0,0653  | 0,0884  | 0,1141  |
| $q$ (kW/m <sup>2</sup> )    |   | -45,005 | -44,957 | -44,902 | -44,997 | -45,541 | -46,333 | -47,243 | -48,215 |
| $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)   |   | 750,09  | 749,28  | 748,37  | 749,95  | 759,03  | 772,22  | 787,38  | 803,58  |
| $Nu_{méd}$                  |   | 5,47    | 5,43    | 5,33    | 5,22    | 5,05    | 4,91    | 4,78    | 4,67    |
| $P$ (mW)                    |   | 7,902   | 8,596   | 10,964  | 14,811  | 24,919  | 38,295  | 54,987  | 75,047  |
| $P_R$ (%)                   |   | -       | 8,77    | 38,74   | 87,42   | 215,31  | 384,57  | 595,79  | 849,63  |



**CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E PROPOSTAS**  
**PARA TRABALHOS FUTUROS**



## 6 Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes após o estudo concluído e também são sugeridas algumas propostas de trabalhos futuros que poderão melhorar e ajudar a complementar o presente estudo e a sua área de investigação.

### 6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi feito o estudo numérico de escoamento num tubo característico de um radiador do sistema de arrefecimento automóvel com nanofluidos. Recorreu-se a dois tipos de abordagens, uma considerando as propriedades do fluido base independentes da temperatura e outra considerando as propriedades do fluido base dependentes da temperatura. Isto teve impacto direto na condição de fronteira de entrada, uma vez que no estudo com as propriedades independentes da temperatura considerou-se o valor das propriedades da água sempre à temperatura de 303,15 K. Enquanto no estudo envolvendo a variação das propriedades com a temperatura, à entrada foi considerada a temperatura típica num radiador de 363,15 K. A abordagem dos dois casos serviu para comparar ambas as situações e concluir que a influência da variação das propriedades do nanofluido com a temperatura, neste tipo de estudos, deve ser tida em conta.

Cada um dos estudos atrás mencionados foi dividido em duas partes, de forma a avaliar a influência do escoamento em regime laminar, em situações distintas tendo em conta o número de Reynolds. Como tal, calculou-se num dos casos as velocidades de entrada a partir de  $Re = 250$ , obtendo-se 0,0429 m/s e 0,0172 m/s para propriedades da água independentes e dependentes da temperatura, respetivamente. E no outro caso obtiveram-se as velocidades de entrada, considerando  $Re = 2000$ , 0,3434 m/s e 0,1376 m/s para as propriedades da água independentes e dependentes da temperatura, respetivamente. Tendo em conta estes casos, foram adicionadas para cada estudo, nanopartículas de dois materiais diferentes, alumina ( $Al_2O_3$ ) e dióxido de titânio ( $TiO_2$ ), sempre com o mesmo fluido base (água).

Após a apresentação dos resultados a primeira conclusão a retirar é que de facto a presença de nanopartículas de alumina e de dióxido de titânio, melhoram as características de transferência de calor do nanofluido (com 0,25 a 10,0 % de nanopartículas) em relação a usar apenas água (0,0 % de nanopartículas). Com o estudo também é possível inferir que em termos dos parâmetros de escoamento o comportamento entre utilizar o nanofluido água/ $Al_2O_3$  e

utilizar o nanofluido água/TiO<sub>2</sub> é muito semelhante, sendo a diferença de valores entre eles pouco relevante.

Outra conclusão a retirar é que a variação da temperatura pode ter bastante influência neste tipo de estudo. Sendo um dos parâmetros analisados, a temperatura, pois o seu comportamento ao longo do tubo tem influência no processo de transferência de calor e conseqüentemente no arrefecimento do sistema de refrigeração do automóvel. Conclui-se que no caso em que as propriedades do nanofluido dependem da temperatura, o processo de transferência de calor, entre o nanofluido e a parede do tubo, é mais eficiente tendo em conta que também se trata de um modelo mais próximo da realidade.

Por fim, também se conclui que o caudal tem grande influência nos parâmetros estudados, onde se verificou que para uma velocidade de entrada associada a um número de Reynolds maior,  $Re = 2000$ , o arrefecimento é menor do que para uma velocidade associada a um número de Reynolds menor,  $Re = 250$ , durante um ciclo. No entanto apesar disto, como a velocidade associada a números de Reynolds é maior, pode compensar com o arrefecimento mais rápido, isto é, o nanofluido executa um maior número de ciclos no mesmo intervalo de tempo, logo pode ser mais eficiente em relação a números de Reynolds mais baixos.

Com tudo isto, tendo em conta apenas os processos relacionados com a transferência de calor, a utilização de nanofluidos no sistema de refrigeração automóvel poderão ser uma boa solução, podendo melhorar a eficiência deste, o que conseqüentemente poderia fazer com que reduzisse o tamanho e o peso do mesmo, podendo isto também traduzir-se numa vantagem em todo o funcionamento geral do automóvel e até dos seus custos. No entanto temos que ter em atenção que este tipo de problemas na realidade, não são lineares, isto é, a avaliação de um único parâmetro separado de uma contextualização particular, pode não ser significativo para o funcionamento e a eficiência geral, é preciso encarar o problema como um todo, tendo em conta todos e variados tipos de fatores que possam ter influência numa situação específica.

## **6.2 Propostas para trabalhos futuros**

Tendo em conta que no presente estudo não foi contabilizado o material constituinte do tubo (paredes), seria uma boa forma de complementar este trabalho fazendo um investigação tendo em conta o tipo de material do tubo e a sua espessura, de modo a verificar até que ponto este pode influenciar nos resultados finais.

Também o presente estudo poderia ser melhorado utilizando agora um modelo de duas fases, aproximando-o ainda mais da realidade.

Hoje em dia utiliza-se outro tipo de fluidos na refrigeração, ao invés de utilizar somente água, são adicionados aditivos com as suas vantagens em termos de pontos de ebulição e de congelamento, os designados anticongelantes. Como trabalho futuro poderia ser boa ideia, utilizar as mesmas condições do presente estudo mas utilizando como fluido base um anticongelante e comparar ambos os resultados.

Uma vez que a geometria utilizada é típica de um radiador automóvel e não existem relações teóricas, como fator de fricção ou número de Nusselt, para este tipo de geometria poderá ser interessante desenvolver relações aproximadas para esta geometria.

Outra abordagem seria fazer uma investigação na mesma base do presente estudo, mas agora considerando diferentes condições de escoamento em regime turbulento, ao invés de regime laminar.



## Referências bibliográficas

- Bejan, A. (1993). Heat Transfer, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Bejan, A. (1995). Convection Heat Transfer, 2nd ed., Wiley, New York.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). Thermodynamics an engineering approach. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill. Higher Education.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Fluid mechanics: Fundamentals and applications. McGraw-Hill Higher Education.
- Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing Thermal Conductivity of Nanofluids with nanoparticles. International mechanical engineering congress and exhibition: San Francisco CA 12-17.
- Eastman, J. A., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., & Keblinski, P. (2004). Thermal transport in nanofluids. *Annual Review of Materials*, 34, 219 – 246.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2001). Introdução à Mecânica dos Fluidos, Quinta Edição. LTC Editora.
- Frass, A. P. (1989). Heat Exchanger Design, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Hussein, A. M., Bakar, R. A., & Kadrigama, K. (2014a). Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 50–61.
- Hussein, A. M. Bakar, R. A., Kadrigama, K., & Sharma, K. V. (2014b). Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids. *Heat Mass Transfer*, 50, 1553 – 1561.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1996. Introduction to Heat Transfer, third ed. John Wiley & Sons, New York.
- Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2016). Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids – A State-of-the-art review. *International Journal of Thermal Sciences*, 100, 75-97.
- Martins, R. J. A. (2014). Estudo numérico da Hemodinâmica na artéria aorta abdominal. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Dissertação de Mestrado.

- Pak, B. C., & Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *International Journal of Experimental Heat Transfer*, 11, 151-70.
- Pássaro, J. P. A. (2015). Desenvolvimento e otimização de um Sistema de coleta térmica aplicado a painéis solares do tipo PV/T. Setúbal. Instituto Politécnico de Setúbal. Dissertação de Mestrado.
- Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill. Book Company
- Pramuditya, S. (2011). Water thermodynamic properties. Physics Department - Technical Document. Disponível em <http://portal.fi.itb.ac.id/tecdoc/waterprop/>.
- Santiago, D. M. N. (2011). Modelo termohidraulico para realimentação do cálculo de seções de choque neutrônicas em reatores PWR. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado.
- Santos, C. C. (2015). Síntese de nanopartículas de sulfeto de cobre, preparação e estabilidade coloidal de fluidos trocadores de calor em meio aquoso. Araraquara: Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista. Dissertação de Mestrado.
- Shah, R. K., & London, A. L. (1971). Laminar flow forced convection heat transfer and flow friction in straight and curved ducts. Technical Report 75.
- Sharma, K. V., Sharma, P. K., Azmi, W. H., Rizalman, M., & Kadirgama, K. (2012). Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water base nanofluids for turbulent flow in a tube. *The International Journal of Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena*, 3(4), 1-25.
- Silva, J. M. C. (2015). Estudo da hidrodinâmica em canais de alimentação de uma membrana semipermeável de dessalinização. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Dissertação de Mestrado.
- Silva, J. C., Soares, A. A., & Rouboa, A. (2014). A numerical study of the hydrodynamic in feed channels of spiral-wound membrane modules. MEFTE 2014 — V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia. 227-232.
- Soares, A. A., Couto, N. T., Marinho, D., Rouboa, A., Mantha, V., & Silva, A. (2011). Momentum and heat transfer in power law fluids across a rotating cylinder: A numerical study.

Numerical analysis and applied mathematics ICNAAM 2011: *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics*, 1389, 175-178

Sousa, P., Soares, A., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2014). A CFD study of the hydrodynamics in a desalination membrane filled with spacers. *Desalination*, 349, 22-30.

Vajjha, R. S., & Das, D. K. (2009). Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 52, 4675 – 82.

Vajjha, R. S., Das, D. K., & Namburu P. K. (2010). Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 613-621.

Vanaki, Sh. M., Ganesan, P., & Mohammed, H. A. (2016). Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1212-1239.

Ribeiro, R., Soares, A. A., & Silva, P.L. (2016). Heat transfer performance of nanofluids in a flat tube In *livro de resumos da 20.<sup>a</sup> Conferencia Nacional de Física* (pp.102). Braga