

JOSEPH EDHER RAMIREZ CHAUPIS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE NANOFLUIDOS
ESCOANDO NO INTERIOR DE DUTOS RETOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

JOSEPH EDHER RAMIREZ CHAUPIS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE NANOFLUIDOS ESCOANDO NO
INTERIOR DE DUTOS RETOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA – MG

2011

*Aos meus pais, **Rosa Chaupis** e **Eudosio Ramírez**, por seu exemplo de superação e serem fonte de amor infinito, em todo lugar e momento.*

*Aos meus irmãos **Aldo**, **Jefferson** e **Gaby**, pelo apoio incansável, e a minha tia **Josefina**, pela motivação constante.*

Joseph E. Ramírez Chaupis

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, e suas constantes oportunidades e desafios.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela orientação e enorme paciência durante o desenvolvimento do trabalho e desta dissertação, assim como também por ser exemplo de esforço e dedicação na vida acadêmica, que seguramente me servirá de motivação em posteriores empreendimentos.

Ao Prof. Dr. Oscar Saul Hernandez Mendoza pelos conselhos oferecidos e pela ajuda no início do curso de mestrado. Ao Prof. Antônio Remi Kieling Hoffmann, pelo imenso apoio na redação e correção desta dissertação.

A meus pais, Rosa e Eudósio, meus irmãos Aldo, Gaby e Jefferson, e minha tia, Josefina, por serem as principais fontes de motivação de todos meus esforços. A Berenice, por ter sido força constante contra toda adversidade nestes mais de dois anos.

Aos meus avós paterno (*in memoriam*) e materno, tios, primos pelo carinho e estímulo constantes.

Aos colegas do Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, Guilherme Azevedo, Douglas Fontes, Arthur Antunes, Carlos Toledo e Juan Paz, pela amizade e a ajuda oferecida sem condição.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Coordenação da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso, e a todos os professores e funcionários que contribuem no sucesso desta instituição.

Ao CNPq, e a CAPES pelo apoio financeiro, e a FAPEMIG pela concessão da bolsa durante o curso de mestrado.

À banca examinadora por suas valiosas sugestões para a conclusão deste trabalho.

RAMIREZ, J.E.C. **Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos**. 2011. 164 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivo evidenciar a intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção de um escoamento utilizando nanofluidos. Para isto, o nanofluido foi simulado numericamente escoando dentro de uma tubulação horizontal reta, tanto em regime laminar como em regime turbulento, e submetida a uma condição de contorno de fluxo de calor constante através da parede, sob a hipótese que o nanofluido possui características de fluido monofásico com propriedades modificadas. Sabendo-se que as propriedades dos nanofluidos são função das propriedades das nanopartículas e do fluido base, foi utilizada uma variedade de combinações desses componentes a fim de mostrar uma tendência sobre o uso de nanopartículas e fluidos base de diferentes naturezas. Desse modo, foram utilizadas nanopartículas metálicas (prata, cobre e ferro) e de óxidos metálicos (alumina e óxido de cobre) dispersas em água deionizada, etileno glicol e poli-alfa-oleofin. As propriedades dos nanofluidos foram calculadas mediante modelos teóricos conservadores para a condutividade térmica e viscosidade, e aplicando a regra das misturas para a massa específica e o calor específico, com base nas propriedades dos componentes encontradas na literatura. Com as propriedades calculadas, cada nanofluido foi simulado com uso do software ANSYS® às condições hidrodinâmicas e térmicas estabelecidas para obter os campos de velocidade, temperatura e pressão correspondentes. Finalmente, os resultados das simulações foram processados para visualizar o comportamento do coeficiente de transferência de calor. Sob as hipóteses definidas, as maiores intensificações na transferência de calor por convecção foram as dos nanofluidos com nanopartículas de óxidos metálicos com relação aos de nanopartículas metálicas.

RAMIREZ, J.E.C. **Numerical simulation of nanofluids flowing through a straight pipe.** 2011. 164 p. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Minas Gerais, Brasil.

Abstract

This work aimed to show the enhancement of the convective heat transfer coefficient of nanofluids flowing in a straight pipe. For this purpose, the nanofluid was simulated numerically, both laminar and turbulent flow, and subjected to a boundary condition of constant heat flow through the wall, under the assumption that nanofluids have characteristics of single-phase fluids with modified properties. With the knowledge that the properties of nanofluids are function of the properties of both, nanoparticles and base fluid, was used a variety of combinations of these components in order to show a trend on the utilization of nanoparticles and base fluids of different natures. Thus, were used metallic nanoparticles (silver, copper and iron) and metallic oxides (alumina and copper oxide) dispersed in deionized water, ethylene glycol and poly-alpha-olefins. The properties of nanofluids were calculated by the conservative theoretical models for thermal conductivity and viscosity, and applying the rule of mixtures for density and specific heat, based on the properties of the components found in the literature. With these properties calculated, each nanofluid was simulated using the computational solver ANSYS®, at hydrodynamic and thermal conditions established, to obtain the corresponding fields for velocity, temperature and pressure. Finally, the results of simulation were processed to visualize the behavior of the convective heat transfer coefficient. Under the assumptions pre-defined, the highest enhancements of convective heat transfer of nanofluids were found with nanoparticles of metal oxides, relative to those of metallic nanoparticles.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Micrografias de nanopartículas. Fonte: Keblinski; Eastman; Cahill, 2005.....	18
Fig. 2.1. Publicações sobre nanofluidos, coletadas pela equipe de nanofluidos do LEST.....	21
Fig. 2.2. Comparação dos materiais mais comuns.....	23
Fig. 2.3. Classificação do banco de artigos.....	30
Fig. 2.4. Efeito sobre a condutividade relativa $k = k_{nf} / k_{fb}$ em relação com a espessura da nanocamada e o diâmetro da anopartícula	33
Fig. 2.5. Incremento da condutividade térmica versus a razão de empacotamento Φ	35
Fig. 2.6. Comparação dos valores calculados com o modelo de Maxwell e dados experimentais	37
Fig. 2.7. Valores de intensificação da condutividade térmica usando os modelos clássicos das referências	39
Fig. 2.8. Representação esquemática da nanocamada interfacial em um arranjo de nanopartículas	40
Fig. 2.9. Desenvolvimento do perfil de velocidade no interior do fluido.....	51
Fig. 2.10. Desenvolvimento do perfil de temperatura no interior do fluido (resfriamento)	52
Fig. 2.11. Desenvolvimento do perfil de temperatura no interior do fluido (aquecimento)	52
Fig. 2.12. Volume de controle para o balanço de energia.....	54
Fig. 2.13. Desenvolvimento das temperaturas de parede e média do fluido	56
Fig. 2.14. Resultados obtidos em soluções de comprimento de entrada para um escoamento laminar em um tubo circular	59
Fig. 2.15. Esquema de bancada operando com fluxo de calor constante	61
Fig. 2.16. Esquema de bancada operando com temperatura de parede constante	62
Fig. 3.1. Representação esquemática da “preparação” de nanofluidos	66
Fig. 3.2. Intensificação da condutividade térmica de nanofluidos para distintas razões de condutividade nanopartícula / fluido base	68
Fig. 3.3. Comparação dos modelos de viscosidade em função da concentração volumétrica	69
Fig. 3.4. Tendência da intensificação da massa específica em nanofluidos variando com a concentração volumétrica	70
Fig. 3.5. Tendência da variação do calor específico em nanofluidos com $\rho_r = 2$, variando com a concentração volumétrica	70
Fig. 3.6. Tendência da variação do calor específico em nanofluidos com $\rho_r = 5$, variando com a concentração volumétrica	71
Fig. 3.7. Massas específicas relativas para os dados da Tab. 3.1	73
Fig. 3.8. Calores específicos relativos para os dados da Tab. 3.1	73
Fig. 3.9. Condutividades térmicas relativas para os dados da Tab. 3.1	74
Fig. 3.10. Esquema do processo de solução numérica de um problema.....	79
Fig. 3.11. Exemplo do isolamento de um elemento objeto de estudo	80
Fig. 3.12. Tipos de células utilizados em CFD.....	81
Fig. 3.13. Vista da janela principal do <i>Workbench</i> ®.....	83
Fig. 3.14. (a) Tipos de análise disponíveis no <i>Workbench</i> ®, (b) Componentes individuais.....	83
Fig. 3.15. Algumas das análises possíveis em ANSYS ®.....	84
Fig. 3.16. Exemplo de integração de diferentes tipos de análises	84
Fig. 3.17. Blocos componentes para simulação mediante <i>Workbench</i> ®	85
Fig. 3.18. Seção de interesse em bancadas experimentais para determinação da intensificação da transferência de calor, operando sob um fluxo de calor constante	86
Fig. 3.19. Esquema do projeto para um escoamento de nanofluidos	87
Fig. 3.20. (a) Esboço da seção tubular, (b) volume formado por extrusão	87
Fig. 3.21. Esquema das seções definidas para a simulação	88
Fig. 3.22. Criação das superfícies das seções	89
Fig. 3.23. Seções definidas a o condicionamento do problema	89
Fig. 3.24. Vista da malha gerada automaticamente pelo <i>Meshing</i> ®	90
Fig. 3.25. Vista da malha com menor número de divisões longitudinais	91
Fig. 3.26. Vista da malha refinada pelo processo <i>Inflation</i>	91
Fig. 3.27. Janela principal do <i>CFX</i> ®	92
Fig. 3.28. Campo de velocidades ao longo de uma seção transversal do tubo	94
Fig. 3.29. Campo de Temperaturas ao longo de uma seção transversal do tubo	95
Fig. 3.30. Velocidade da linha central	95

Fig. 3.31. Comportamento da temperatura na linha central e na parede do tubo	96
Fig. 3.32. Vista esquemática da posição das seções de controle	97
Fig. 3.33. Vista da janela principal do FLUENT ®	98
Fig. 3.34. Definição dos modelos (a) e dos materiais (b) a utilizar nas simulações	99
Fig. 3.35. Janela de definição da velocidade de entrada (regime turbulento)	100
Fig. 3.36. Definição do fluxo de calor constante (regime turbulento)	100
Fig. 3.37. Esquema do projeto para a simulação dos nanofluidos baseados em água, escoando em regime turbulento	101
Fig. 4.1. Tendência das propriedades para o nanofluido F1N1 variando com a concentração volumétrica.....	103
Fig. 4.2. Tendência das propriedades para o nanofluido F1N2 variando com a concentração volumétrica.....	104
Fig. 4.3. Tendência das propriedades para o nanofluido F1N3 variando com a concentração volumétrica.....	104
Fig. 4.4. Tendência das propriedades para o nanofluido F1N4, variando com a concentração volumétrica.....	105
Fig. 4.5. Tendência das propriedades para o nanofluido F1N5, variando com a concentração volumétrica.....	105
Fig. 4.6. Destaque da tendência das propriedades para o nanofluido F1N4 variando com a concentração volumétrica	106
Fig. 4.7. Tendência das propriedades para o nanofluido F2N3, variando com a concentração volumétrica.....	107
Fig. 4.8. Tendência das propriedades para o nanofluido F2N4, variando com a concentração volumétrica.....	108
Fig. 4.9. Tendência das propriedades para o nanofluido F2N5, variando com a concentração volumétrica.....	108
Fig. 4.10. Tendência das propriedades para o nanofluido F3N3, variando com a concentração volumétrica.....	109
Fig. 4.11. Tendência das propriedades para o nanofluido F3N4, variando com a concentração volumétrica.....	109
Fig. 4.12. Tendência das propriedades para o nanofluido F3N5, variando com a concentração volumétrica.....	110
Fig. 4.13. Variação do Pr para todos os nanofluidos, variando com a concentração volumétrica.....	111
Fig. 4.14. Variação do Pr dos nanofluidos baseados em água, variando com a concentração volumétrica.....	111
Fig. 4.15. Variação do Pr dos nanofluidos baseados em etileno glicol, variando com a concentração volumétrica.....	112
Fig. 4.16. Variação do Pr dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin, variando com a concentração volumétrica.....	112
Fig. 4.17. Perfil de velocidade para o nanofluido F1N1 ($Re=250$).....	114
Fig. 4.18. Perfil de velocidade para o nanofluido F1N4 ($Re=250$).....	114
Fig. 4.19. Perfil de velocidade para o nanofluido F2N3 ($Re=100$).....	115
Fig. 4.20. Perfil de velocidade para o nanofluido F2N4 ($Re=100$).....	115
Fig. 4.21. Perfil de velocidade para o nanofluido F3N3 ($Re=100$).....	116
Fig. 4.22. Perfil de velocidade para o nanofluido F3N4 ($Re=100$).....	116
Fig. 4.23. Perfil de velocidade para o nanofluido F1N1 ($Re=10000$).....	117
Fig. 4.24. Perfil de velocidade para o nanofluido F2N3 ($Re=10000$).....	117
Fig. 4.25. Perfil de velocidade para o nanofluido F3N3 ($Re=10000$).....	118
Fig. 4.26. Perfil de velocidade para o nanofluido F1N4 ($Re=10000$).....	118
Fig. 4.27. Perfil de velocidade para o nanofluido F2N4 ($Re=10000$).....	119
Fig. 4.28. Perfil de velocidade para o nanofluido F3N4 ($Re=10000$).....	119
Fig. 4.29. Perfil de temperatura para o nanofluido F1N1 ($Re=250$).....	121
Fig. 4.30. Perfil de temperatura para o nanofluido F2N3 ($Re=100$).....	122
Fig. 4.31. Perfil de temperatura para o nanofluido F3N3 ($Re=100$).....	122
Fig. 4.32. Perfil de temperatura para o nanofluido F1N4 ($Re=250$).....	123
Fig. 4.33. Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 ($Re=100$).....	123
Fig. 4.34. Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 ($Re=100$).....	124

Fig. 4.35. Perfil de temperatura para o nanofluido F1N1 (Re=10000)	125
Fig. 4.36. Perfil de temperatura para o nanofluido F2N3 (Re=10000)	125
Fig. 4.37. Perfil de temperatura para o nanofluido F3N3 (Re=10000)	126
Fig. 4.38. Perfil de temperatura para o nanofluido F1N4 (Re=10000)	126
Fig. 4.39. Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 (Re=10000)	127
Fig. 4.40. Perfil de temperatura para o nanofluido F3N4 (Re=10000)	127
Fig. 4.41. Temperaturas média e de parede ao longo da tubulação para o nanofluido F1N1	128
Fig. 4.42. Temperaturas média e de parede ao longo da tubulação, para o nanofluido F2N3	129
Fig. 4.43. Temperaturas média e de parede ao longo da tubulação para o nanofluido F3N3	129
Fig. 4.44. Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em água	131
Fig. 4.45. Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em etileno glicol	132
Fig. 4.46. Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin	133
Fig. 4.47. Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em água para regime laminar	134
Fig. 4.48. Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em etileno glicol para regime laminar	134
Fig. 4.49. Coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin para regime laminar	135
Fig. 4.50. Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin escoando em regime laminar	135
Fig. 4.51. Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em água para regime turbulento	136
Fig. 4.52. Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em água escoando em regime turbulento	137
Fig. 4.53. Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em etileno glicol para regime turbulento	137
Fig. 4.54. Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin para regime turbulento	138
Fig. 4.55. Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin escoando em regime turbulento	139
Fig. 4.56. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em água (regime laminar)	139
Fig. 4.57. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime laminar)	140
Fig. 4.58. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime laminar)	140
Fig. 4.59. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento)	141
Fig. 4.60. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime turbulento)	141
Fig. 4.61. Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime turbulento)	142
Fig. 4.62. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime laminar)	143
Fig. 4.63. Destaque da tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime laminar)	144
Fig. 4.64. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime laminar)	144
Fig. 4.65. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime laminar)	145
Fig. 4.66. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento)	145
Fig. 4.67. Destaque da tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento)	146
Fig. 4.68. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime turbulento)	146
Fig. 4.69. Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime turbulento)	147

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1. Pesquisas experimentais sobre a intensificação da condutividade térmica	26
Tab. 2.2. Modelos clássicos para o cálculo da condutividade térmica efetiva de suspensões sólido/líquido	38
Tab. 2.3. Modelos teóricos para a determinação da viscosidade efetiva dos nanofluidos	45
Tab. 3.1. Propriedades de fluidos base e nanopartículas usadas	66
Tab. 3.2. Massa específica relativa para os dados da Tab. 3.1	72
Tab. 3.3. Calores específicos relativos dos dados da Tab. 3.1	72
Tab. 3.4. Condutividades térmicas relativas dos dados da Tab. 3.1	72
Tab. 3.5. Combinações de nanofluidos restringidas	75
Tab. 3.6. Identificadores dos nanofluidos a serem utilizados	75
Tab. 3.7. Propriedades dos nanofluidos a serem usados nas simulações	76
Tab. 3.8. Condições de contorno sobre o domínio do fluido em regime laminar	93
Tab. 3.9. Condições de contorno sobre o domínio do fluido em regime turbulento	98
Tab. 4.1. Velocidades de entrada para nanofluidos que contêm alumina	120
Tab. 4.2. Variações das propriedades dos nanofluidos	149
Tab. 4.3. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em água, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada	150
Tab. 4.4. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada	150
Tab. 4.5. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada	151

SIMBOLOGIA

Arábicos

A	Área [m ²]
A_c	Área da transferência de calor [m ²]
C	Parâmetro empírico do modelo de Jang e Choi
C_p	Calor específico
d_f	Dimensão fractal do agregado
d_{np}	Diâmetro da nanopartícula [nm]
D	Diâmetro do tubo [m]
D_p	Constante de difusão particular
f	Fator de atrito
Gz	Número de Graetz
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² -K]
I	Intensidade da turbulência (%)
k	Condutividade térmica [W/m-K]
k_B	Constante de Boltzmann [m ² kg/s ² -K]
k_{np}^R	Resistência de contato da nanopartícula
l	Comprimento de escala da turbulência [m]
L	Comprimento [m]
L_{ent}	Comprimento de entrada no tubo [m]
L_{teste}	Comprimento de testes no tubo [m]
m	Parâmetro semi-empírico para o modelo de condutividade térmica de Wiener
M	Parâmetro do modelo de Xie
$\dot{m}$	Vazão mássica [m ³ /s]
Nu	Número de Nusselt
Pe	Número de Peclet

Pr	Número de Prandtl
Δp	Queda de pressão
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor [W]
r	Raio
R	Raio do tubo [m]
Re	Número de Reynolds
t	Tempo [s]
t_{nc}	Espessura da nanocamada [nm]
T	Temperatura [K]
ΔT_{ml}	Diferença de temperatura média logarítmica
u_m	Velocidade axial média [m/s]
u'	Velocidade flutuante característica da turbulência [m/s]
$\dot{W}$	Potência de bombeamento [W]

Gregos

α	Difusividade térmica [m ² /s]
β	Razão entre a espessura de nanocamada e raio da nanopartícula no modelo de Xie
γ	Parâmetro do modelo de Leong
ε	Razão entre condutividades
θ	Parâmetro do modelo de Xie
μ	Viscosidade dinâmica [Pa-s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
τ	Parâmetro no modelo de Xue
τ_D	Escala de tempo para o deslocamento da nanopartícula
τ_H	Escala de tempo para o transporte de calor

ϕ	Concentração volumétrica (%)
Φ	Razão de empacotamento de nanopartículas
ψ	Parâmetro de esfericidade no modelo de Hamilton Crosser

Subscritos

<i>cl</i>	<i>Cluster</i>
<i>fb</i>	Fluido base
<i>m</i>	Média
<i>np</i>	Nanopartícula
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>nc</i>	Nanocamada
<i>p</i>	Parede

Siglas

ADI	Água deionizada
EG	Etileno glicol
PAO	Poli-alfa-oleofin
EMT	Effective Medium Theory
CVD	Chemical Vapor Deposition
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução	16
1.1. Motivação	16
1.2. Objetivos	17
1.3. Considerações iniciais	17
1.3.1. Nanotecnologia	17
1.3.2. Nanofluido.....	18
1.4. Organização do texto.....	19
 CAPÍTULO 2 - Revisão Bibliográfica	 20
2.1. Introdução	20
2.2. Coleta de artigos	21
2.3. Síntese de nanofluidos	22
2.3.1. Métodos de um passo	24
2.3.2. Métodos de dois passos	25
2.3.3. Outros métodos	26
2.4. Caracterização dos nanofluidos	27
2.5. Estimativa das propriedades intensificadas dos nanofluidos	29
2.5.1. Mecanismos de transporte de calor em nanofluidos	30
2.5.2. Correlações teóricas para determinar a condutividade térmica de nanofluidos	36
2.5.3. Correlações teóricas para determinar a viscosidade de nanofluidos.....	44
2.5.4. Correlações teóricas para outras propriedades de nanofluidos.....	45
2.6. Convecção forçada em escoamento interno	46
2.6.1. Considerações hidrodinâmicas e térmicas	47
2.6.2. Tipos de regimes de escoamento	50
2.6.3. Região de entrada	51
2.6.4. Comprimentos de entrada	53
2.6.5. Análise térmica preliminar: Duas condições de contorno	54
2.6.6. Correlações para convecção laminar e turbulenta em dutos	57
2.7. Transferência de calor por convecção de nanofluidos	61
2.7.1. Pesquisas experimentais	61
2.7.2. Simulações numéricas	63

CAPÍTULO 3 – Materiais e métodos	65
3.1. Introdução	65
3.2. Cálculo das propriedades de nanofluidos	65
3.3. Alcances sobre simulação numérica	77
3.4. Entorno de trabalho do <i>Workbench</i> ®	82
3.5. Definição das características do problema	85
3.5.1. <i>Criação da geometria</i>	87
3.5.2. <i>Geração da malha numérica</i>	90
3.5.3. <i>Configuração do problema físico em regime laminar</i>	92
3.5.4. <i>Configuração do problema físico em regime turbulento</i>	97
 CAPÍTULO 4 - Resultados	 102
4.1. Introdução	102
4.2. Variação das propriedades	102
4.2.1. <i>Variação do número de Prandtl</i>	110
4.3. Desenvolvimento do escoamento de nanofluido	113
4.3.1. <i>Comportamento hidrodinâmico</i>	113
4.3.2. <i>Comportamento térmico</i>	121
4.4. Intensificação da Transferência de calor	128
4.4.1. <i>Temperaturas média e de parede</i>	128
4.4.2. <i>Coeficiente de transferência de calor</i>	130
4.4.3. <i>Número de Nusselt</i>	139
4.5. Queda de pressão	143
4.6. Resumo dos resultados.....	148
 CAPÍTULO 5 – Conclusões e sugestões	 153
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 156

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Na atualidade, a dissipação de calor é uma das maiores barreiras de uma ampla faixa de sistemas, que vão desde o nível micro (chips de computador, outros componentes eletrônicos, etc.) ao nível macro (sistemas de refrigeração industrial, automotivo, entre outros). A quantidade de calor gerada por cada processo tem incrementado notavelmente com o desenvolvimento das suas capacidades e, com isso, a necessidade de serem resfriados de forma adequada para atingir o máximo desempenho. A partir daí, numerosos esforços apontaram para o melhoramento dos sistemas de transferência de calor utilizados na indústria. Nesse sentido, a busca de novos materiais e novos fluidos de trabalho com características técnicas favoráveis são indispensáveis para, finalmente, aumentar a capacidade de troca de calor desses sistemas.

Com o progresso da ciência e engenharia térmica, o desenvolvimento de dispositivos e sistemas de escala cada vez menores tornou-se uma área de grande interesse. Como resultado é possível obter uma considerável redução no tamanho desses dispositivos ou mesmo sistemas, operando com igual ou maior eficiência térmica sem variar drasticamente seus princípios básicos de funcionamento. Exemplos dos setores favorecidos com este tipo

de pesquisa são: as indústrias do transporte, eletrônica, química, aeroespacial, usinagem, entre outros.

Com estas considerações, o presente trabalho pretende contribuir na confirmação da intensificação da transferência de calor com o uso de nanofluidos, vislumbrando sua aplicação prática em sistemas térmicos.

1.2. Objetivos

- Calcular os valores intensificados das principais propriedades termofísicas dos nanofluidos mais comumente encontrados em pesquisas teóricas e experimentais, com uso dos modelos teóricos desenvolvidos para tal fim por diferentes autores.
- Observar o comportamento térmico e hidrodinâmico de um escoamento de nanofluidos em uma tubulação horizontal reta de seção circular, tanto em regime laminar como turbulento.

1.3. Considerações iniciais

1.3.1. Nanotecnologia

Richard Feynman, na palestra do ano 1959 no California Institute of Technology, foi quem primeiro vislumbrou a possibilidade de manipular a matéria em uma escala menor que a micrométrica para a obtenção de tecnologias que permitam o aproveitamento de todo o espaço que “*há lá embaixo*” (FEYNMAN, 1959).

Daí em diante, o termo *nanotecnologia* (criado pelo pesquisador japonês Norio Taniguchi em 1974 e popularizado por Eric Drexler na década de 1980) tem sofrido muitas adaptações de acordo aos campos de aplicação que foram surgindo ao longo do tempo. Assim, a nanotecnologia pode ser entendida como a construção de dispositivos e a fabricação de materiais funcionais mediante o controle da matéria na escala dos nanômetros. Com o afastamento cada vez maior das leis da física clássica para se adentrar na *física do estado sólido*, são esperados novos fenômenos e novas propriedades da matéria.

1.3.2. Nanofluido

No campo da produção de materiais, a obtenção de partículas de dimensões na faixa de 1 a 100 nanômetros ($1\text{nm} < 10^{-9}\text{ m}$) representa o melhoramento das propriedades inerentes de alguns materiais convencionais. A Fig. 1.1 mostra micrografias obtidas mediante um microscópio de transmissão eletrônica (TEM, por suas siglas em inglês) para: (a) nanopartículas de cobre, (b) nanopartículas de óxido de cobre.

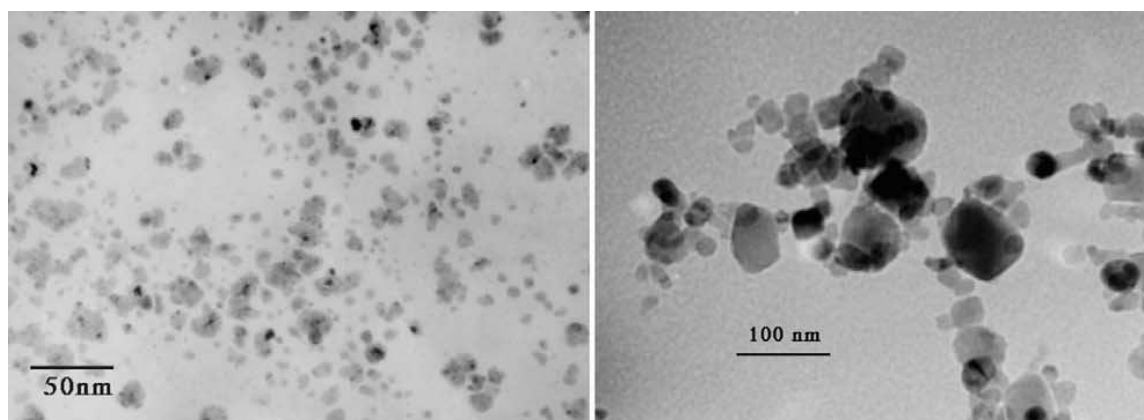


Figura 1.1 – Micrografias de nanopartículas. Fonte: Keblinski; Eastman; Cahill, 2005.

Além disso, a *união* dessas nanopartículas com outros materiais estão produzindo, como resultado, novos compostos com intensificação de propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas, etc. Nesse sentido, na literatura é possível encontrar pesquisas que usam nanopartículas metálicas para incrementar as propriedades mecânicas de resinas (Guo et al., 2007), ou usam nanopartículas ferromagnéticas em fluidos para a manipulação desses novos *ferrofluidos* (Holm; Weis, 2005).

Particularmente na área térmica, tem-se o grande desafio do resfriamento em muitos campos das mais diversas indústrias. Assim, na eletrônica tem-se a miniaturização da estrutura dos dispositivos de dissipação de calor (Squires e Quake, 2005; e Eijkel e Berg, 2005), passando pelos sistemas de remoção de calor em motores de combustão interna (Valderrama, 2010), até chegar ao resfriamento de reatores em usinas nucleares (Buongiorno; Hu, 2009). A forma convencional para incrementar a dissipação de calor é aumentar a área disponível para a troca de calor com o fluido de trabalho. No entanto, um inconveniente desta abordagem é que, junto com o tamanho do sistema, complica-se a gestão da energia desses sistemas. Surge assim, a necessidade de melhorar as propriedades de transferência de calor dos fluidos de trabalho já usados ou a produção de novos compostos. Da conjunção de ambos os fatores anteriores e com base em estudos

passados sobre meios heterogêneos, previu-se o uso de nanopartículas em fluidos refrigerantes convencionais.

São denominados **nanofluidos** aqueles materiais compostos por nanopartículas ou nanofibras, na ordem de 1 a 100 nanômetros, suspensas em fluidos refrigerantes. É importante destacar que estes fluidos possuem propriedades térmicas muito baixas quando comparadas com as de outros materiais como metais. Inúmeras pesquisas experimentais têm demonstrado a intensificação anômala das propriedades dos nanofluidos, principalmente a condutividade térmica. Tais nanofluidos apresentam algumas vantagens em relação àquelas suspensões que usavam partículas de maiores dimensões (tamanhos micro e milimétrico); entre elas: (1) uma maior estabilidade, (2) menor impacto abrasivo e (3) a maior facilidade para escoar em microcanais, com menor risco de aglomeração. Tais vantagens aumentaram o interesse nestes novos compostos.

1.4. Organização do texto

De forma resumida, o presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica levantada sobre diversas publicações que estudaram as características dos nanofluidos vislumbrando sua aplicação em processos de transferência de calor, que inclui: síntese, caracterização e estimativa das propriedades modificadas dos nanofluidos. Além disso, é apresentado um resumo da teoria de convecção forçada em escoamento interno, incluindo algumas noções iniciais sobre a convecção de nanofluidos.

No Capítulo III é descrita a metodologia empregada para a criação do grupo de nanofluidos simulados. Também é feito um breve resumo das características dos programas utilizados para as simulações (WORKBENCH®, CFX® e FLUENT®), que inclui a definição das condições geométricas e físicas do problema estudado.

O Capítulo IV apresenta, primeiramente, as tendências de variação das propriedades modificadas dos nanofluidos estudados em relação com a concentração volumétrica. Tais tendências serão ilustradas na tentativa de vislumbrar o efeito combinado dessas variações na transferência de calor. Seguidamente serão apresentados os resultados das simulações numéricas realizadas nas condições definidas, processados de forma conveniente para mostrar o desenvolvimento hidrodinâmico e térmico do escoamento de nanofluido, a intensificação da transferência de calor e a queda de pressão.

Finalmente, o Capítulo V reúne as conclusões derivadas desta dissertação, assim como também sugestões para futuros trabalhos nesta linha de pesquisa.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Este capítulo começa com uma breve descrição do banco de artigos que foram coletados ao longo de dois anos pelo grupo de nanofluidos do Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LEST – UFU).

Logo depois são resumidas as principais características dos métodos mais comuns empregados na síntese dos nanofluidos, além do papel importante que desempenha a caracterização dos mesmos para um melhor entendimento dos fenômenos de intensificação da condutividade térmica e da viscosidade, e que é observada em inúmeras pesquisas.

Seguidamente, é feita uma pequena exposição das principais hipóteses dos mecanismos de transporte de calor em nanofluidos, junto com algumas correlações para a descrição da intensificação das propriedades termofísicas mais relevantes dos nanofluidos, que serão utilizadas posteriormente para calcular as propriedades do banco de nanofluidos a simular.

Finalmente, é feito um resumo das considerações gerais da convecção forçada de escoamentos internos, que servirão de base para, em princípio, validar os resultados das simulações realizadas, e também para o cálculo do principal objeto de estudo: o coeficiente de transferência de calor por convecção.

2.2. Coleta de artigos

As pesquisas iniciais e o desenvolvimento da tecnologia de nanofluidos têm demonstrado o enorme potencial desses novos fluidos em aplicações de transferência de calor. Potencial que reúne atualmente grandes esforços de parte da indústria e de muitas universidades a nível mundial. Tem sido observado também, que o incremento dos valores das principais propriedades dos nanofluidos depende fortemente da relação entre as propriedades do fluido base e das nanopartículas.

Nos últimos dez anos, observou-se um aumento elevado do número de publicações na literatura aberta (essencialmente periódicos) que reportaram diversas pesquisas experimentais, teóricas ou de revisão sobre o estudo dos nanofluidos. Na Fig. 2.1. mostra-se o incremento das pesquisas por ano, na década passada. Grande parte desta bibliografia em constante crescimento está enfocada na descrição completa do fenômeno físico que permite aos nanofluidos intensificar muitas das suas propriedades termofísicas, além dos limites esperados (previstos por modelos teóricos) para tais compostos. Com esse objetivo e dentro da área térmica, a teoria para meios heterogêneos é aplicada na tentativa de descrever principalmente os valores anômalos da condutividade térmica.

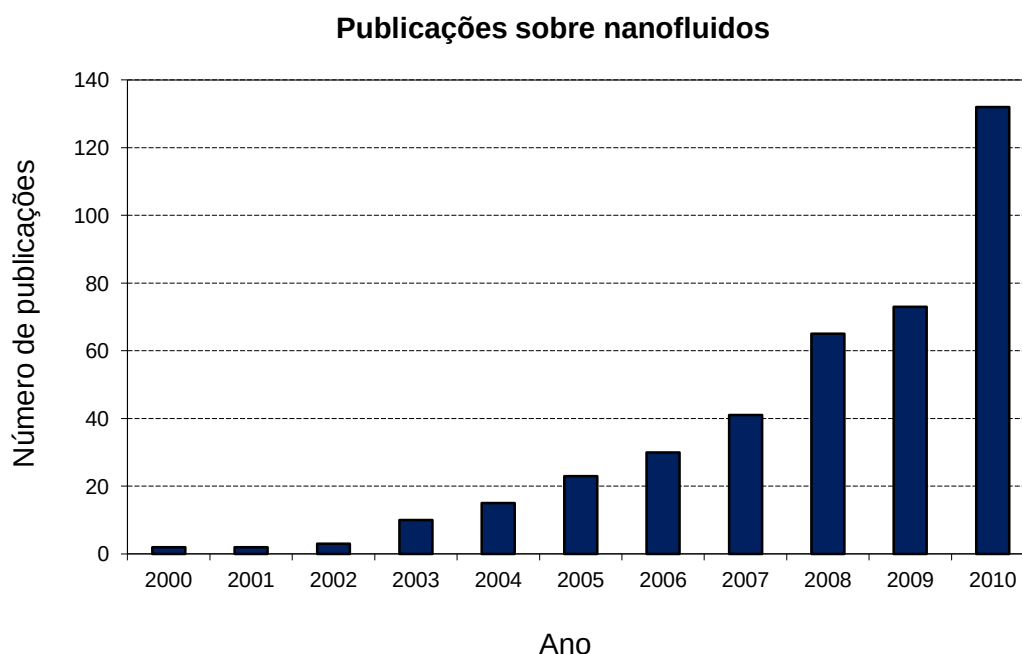


Figura 2.1 – Publicações sobre nanofluidos, coletadas pela equipe de nanofluidos do LEST-UFU.

Entretanto, a transição do estudo teórico para a aplicação industrial requer um maior desenvolvimento da teoria de nanofluidos e a superação de algumas barreiras tecnológicas para sua produção. Nesse sentido, é interessante destacar que o acesso à informação sobre nanofluidos não tem ainda muitas restrições, apesar de existirem algumas publicações de caráter privativo.

O banco de artigos publicados, coletado pelo grupo de nanofluidos do LEST-UFU, é específico sobre as pesquisas de nanofluidos na área térmica, visando a sua aplicação industrial. Até dezembro de 2010 contava com pouco mais de trezentos artigos. As publicações foram inicialmente divididas nas seguintes categorias:

- Experimental: Nos quais predomina a observação das propriedades dos nanofluidos e a resposta destes quando são submetidos a determinadas condições (na tentativa de descrever seu comportamento hidrodinâmico e térmico).
- Computacional: Este grupo contém aqueles artigos que pretendem prever algumas das propriedades dos nanofluidos baseados em parâmetros definidos e a análise dos mecanismos físicos envolvidos. Também, se encontram aqui artigos sobre simulação numérica de escoamentos de nanofluidos para diferentes configurações.
- Revisão: Neste grupo estão incluídos os artigos que observam e/ou detalham o desenvolvimento de um ou vários aspectos do estudo e resumem as principais pesquisas sobre nanofluidos.

Dentro de cada uma das duas primeiras áreas foi criada uma subdivisão que depende do enfoque de cada pesquisa:

- Caracterização (propriedades térmicas e reológicas)
- Convecção (subdividido em monofásico e bifásico)
- Transferência de massa
- Outros

No caso dos artigos de revisão, não existe subdivisão uma vez que abordam temas diversos que muitas vezes incluem os tópicos mencionados anteriormente.

2.3. Síntese de nanofluidos

Quando comparadas, a condutividade térmica dos fluidos utilizados em processos de transferência de calor é muitas vezes menor do que a condutividade de materiais sólidos (inclusive várias ordens de magnitude no caso de sólidos metálicos). As diferenças são mostradas na Fig. 2.2.

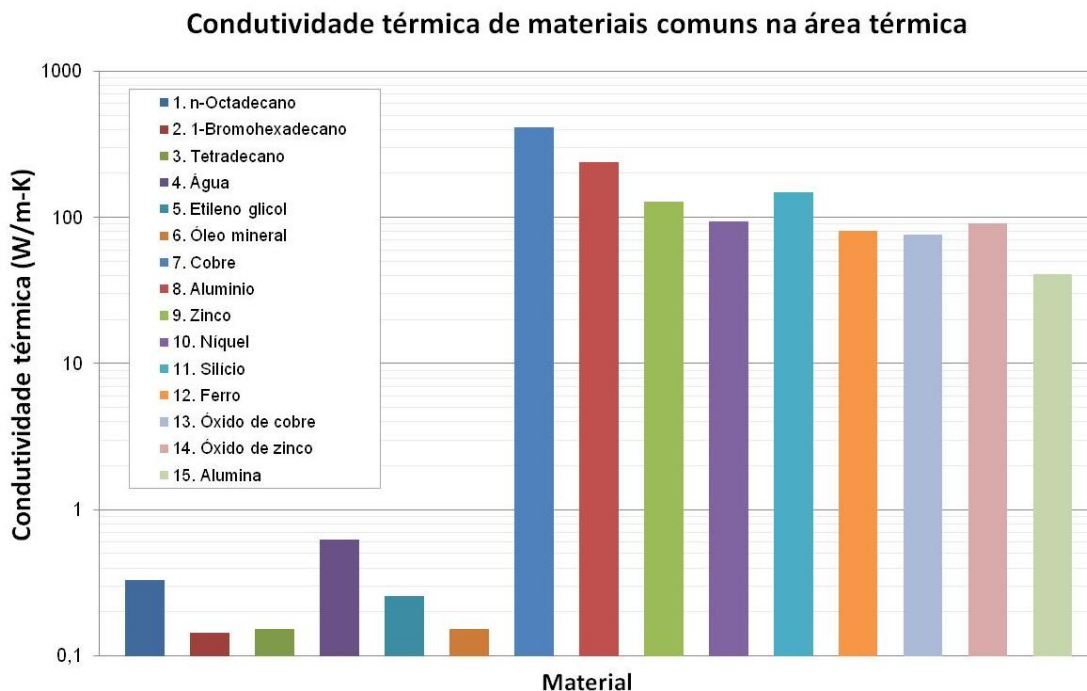


Figura 2.2 – Comparação dos materiais mais comuns. Fonte: WEN et al., 2009.

A síntese de nanofluidos é um passo chave para sua utilização em aplicações práticas, sobretudo em aspectos como a homogeneidade e estabilidade, na procura da otimização das propriedades térmicas intensificadas. Segundo as exigências das futuras aplicações, diferentes combinações de fluido base e nanopartícula deverão ser empregadas. Nesse sentido, é possível obter dispersões de nanopartículas de óxidos, nitratos, metais, carbonetos e não metais, em fluidos como água, etileno glicol e diversos tipos de óleos. Apesar de que pesquisas iniciais não levaram em conta os aspectos da síntese das nanopartículas, na atualidade esta é considerada um fator relevante na hora de produzir o nanofluido.

Os nanofluidos podem ser obtidos mediante dois tipos de processo bem diferenciados: o primeiro: a dispersão de nanopartículas produzidas com antecedência, por meios físicos ou químicos, no fluido base; e o segundo: pela degradação de um material base e sua dispersão direta dentro do fluido base. Em ambos os casos, podem ser usados aditivos que facilitem a homogeneização e garantam a estabilidade do nanofluido produzido. Atualmente os métodos mais comuns para a obtenção de nanofluidos podem ser classificados em: i) Métodos de um passo e ii) Métodos de dois passos. A seguir, é apresentada uma breve descrição dos métodos mais utilizados para a síntese de nanofluidos para uso experimental, assim como as vantagens e desvantagens existentes para sua aplicação industrial.

2.3.1. Métodos de um passo

Denominam-se assim aqueles processos que combinam a síntese das nanopartículas com a preparação dos nanofluidos em um só passo. Dentro desta categoria, são comuns os processos de evaporação direta de materiais sólidos (realizada em condições de vácuo sobre um escoamento do fluido base em baixa pressão) e os processos de precipitação química. Estes tipos de técnicas têm grande sucesso por reduzirem os efeitos da aglomeração das nanopartículas em geral. Em particular, são utilizados principalmente para sintetizar nanopartículas de metais sólidos, pois previnem em maior medida sua oxidação devido às condições em que opera.

Um exemplo do uso desta técnica pode ser encontrado em Eastman et al. (2001), onde foi utilizado um método físico de um passo para a preparação dos nanofluidos. Neste processo, vapor de cobre foi diretamente condensado em forma de nanopartículas ao contato com um escoamento de etileno glicol à baixa pressão no interior de uma câmara de vácuo. A mistura homogênea de nanopartículas de cobre em etileno glicol mostrou um incremento na condutividade térmica de 40% a uma concentração volumétrica de 0,3%, significativamente maior do que a previsão feita através da Teoria do Meio Efetivo (Effective Medium Theory ou EMT por suas siglas em inglês).

Outro método físico de um passo é o desenvolvido por Tsung et al. (2003), denominado SANSS (Sistema de Síntese de Nanopartículas por Arco Submerso). Este método já foi capaz de produzir, com sucesso, nanofluidos com nanopartículas de cobre (Lo et al., 2005a), óxido de cobre (Lo et al., 2005b) e óxido de titânio (Chang et al., 2003). Com este método, as nanopartículas são produzidas pelo aquecimento do material sólido em um eletrodo mediante a ignição por arco elétrico e imediatamente condensadas em um fluido no interior de uma câmara de vácuo para formar o nanofluido. Uma grande desvantagem deste tipo de método é a reduzida quantidade de nanofluidos obtidos, apenas a necessária para propósitos de pesquisa; sobretudo por causa da dificuldade tecnológica e econômica que implica o condicionamento da câmara de vácuo, que dificulta a produção em grande escala.

A desvantagem comum de ambos os métodos sejam físicos ou químicos é que estes são desenvolvidos em processos por lotes, além de ter um controle limitado sobre um número de parâmetros importantes, incluído o tamanho da nanopartícula. A possibilidade de realizar a síntese de maneira contínua e controlada incrementaria sua viabilidade comercial. Outra restrição para o uso deste tipo de processos, é que o fluido base deve possuir uma baixa pressão de vapor (o contrário traz consigo o aumento de aglomerações das nanopartículas). Por tudo isto, é ainda difícil vislumbrar este tipo de método como o principal fornecedor comercial de nanofluidos nos próximos anos.

2.3.2. Métodos de dois passos

Estudos experimentais iniciais sobre nanofluidos utilizaram processos de dois passos, que primeiro sintetizam as nanopartículas em forma de um pó seco ultrafino, em sua maioria obtida por condensação de gás inerte (IGC, por suas siglas em inglês). Este método primeiro vaporiza o material base em uma câmara de vácuo e a seguir condensa esse vapor em nanopartículas por colisão com um fluxo de gás inerte à pressão controlada (sendo esta a principal diferença do método de um passo, no qual o contato ocorre entre o material vaporizado e o fluido base diretamente). As nanopartículas obtidas no primeiro passo são depois dispersas no fluido base mediante processos físicos de mistura como sonicação ou homogeneização a altas pressões.

Uma das maiores vantagens deste tipo de método é a grande variedade de nanofluidos que se pode obter. Praticamente qualquer material cerâmico, metálico ou não metálico pode ser reduzido a um pó ultrafino e daí ser misturado em um fluido base previamente condicionado para tal fim. Destaca-se também entre as vantagens o menor custo que representaria para a produção de nanopartículas e nanofluidos em escala industrial.

No entanto, o método de dois passos apresenta desvantagens que são considerados desafios tecnológicos: A alta probabilidade de aglomeração e oxidação das nanopartículas. Estes fenômenos podem se apresentar durante todo o processo (antes, durante ou depois da mistura). Nesse sentido, a aglomeração é um assunto crítico em todo desenvolvimento tecnológico da manipulação de materiais a escala nanométrica, incluindo os nanofluidos. O problema de aglomeração é devido às forças intermoleculares de Van Der Waals entre as nanopartículas, sendo uma das principais barreiras para a produção de nanofluidos em grandes quantidades por meio deste processo. Uma solução para este inconveniente é a aplicação de um tratamento químico na superfície de contato das nanopartículas e o fluido base para melhorar a dispersão e reduzir os efeitos das forças intermoleculares. Algumas suspensões de material particulado que estão disponíveis no mercado (cerâmicos e magnéticos são os mais comuns) apresentam os mesmos problemas de aglomeração e sedimentação. Embora o uso de nanopartículas de óxidos metálicos requer uma maior concentração (em comparação com os nanofluidos baseados em nanopartículas metálicas), que incrementa a probabilidade de apresentar aglomerações e deposição com o passar do tempo, estes são preferidos em relação às nanopartículas metálicas por serem menos sensíveis à oxidação.

Na Tab. 2.1, é apresentada uma lista de algumas pesquisas experimentais desenvolvidas até o presente momento, onde destacam-se a variedade da natureza e tamanho das nanopartículas.

Tabela 2.1. Pesquisas experimentais sobre a intensificação da condutividade térmica.

	Autor (ano)	Nanofluido	Concentração (%)	Tamanho (nm)
Método de Um Passo	Eastman et al. (2001)	Cu (velho) + EG	0,56	10
		Cu (novo) + EG	0,56	10
		Cu + EG	0,28	10
	Zhu et al. (2007)	Fe ₃ O ₄ + Água	4,00	10
	Liu et al. (2006)	Cu + Água	0,10	50-100
		Cu + Água	0,10	75-100
		Cu + Água	0,05	100-200
		Cu + Água	0,10	100-300
		Cu + Água	0,05	130-200
		Cu + Água	0,20	130-300
		Cu + Água	0,20	250
		Cu + Água	0,20	200-500
Método de Dois Passos	Wang et al (1999)	Al ₂ O ₃ + Água	5,50	28
		CuO + Água	9,70	23
		Al ₂ O ₃ + EG	8,00	28
		CuO + EG	14,80	23
		Al ₂ O ₃ + Óleo	7,40	28
		Al ₂ O ₃ + Óleo hydr.	7,10	28
	Xuan & Li (2000)	Cu + Água	7,50	100
		Cu + Óleo	7,50	100
	Patel et al. (2003)	Ag + Tolueno	0,001	60-80
		Au + Tolueno	0,00026	8-20
	Murshed et al. (2005)	TiO ₂ + Água + Disp.	5,00	15
		TiO ₂ + Água + Disp.	5,00	10 - 40
	Lee et al. (2006)	CuO + Água	0,30	25
		CuO + Água	0,30	25

2.3.3. Outros métodos

As técnicas anteriormente descritas são as de maior utilização, mas não as únicas. Existem outras técnicas disponíveis para combinações específicas de nanopartículas e fluidos base. Por exemplo, nanopartículas com determinadas geometria, carga, porosidade, podem ser fabricadas por eletrólise, deposição metálica, estruturação camada por camada, secagem de micro gotas e outras técnicas químicas para colóides.

Dentre outros processos, a técnica de Condensação Química de Vapor (Chemical Vapor Deposition, CVD) parece superar os inconvenientes no controle do tamanho de nanopartícula, facilidade de escala e a possibilidade de produzir novas estruturas tipo nanopartícula-camada. Este é um processo químico usado para produzir materiais sólidos de alta pureza e rendimento. Embora seja mais usado na obtenção de filmes ultrafinos em supercondutores. Neste processo, um substrato é exposto a um precursor gasoso rico em carbono, por exemplo um hidrocarboneto, para produzir nanotubos de carbono.

Inicialmente, esse processo foi desenvolvido por Cheng et al. (1998) para a obtenção de nanotubos de carbono de parede simples e posteriormente foi utilizada em muitas outras pesquisas experimentais, como a de Choi et al. (2001) com nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersas em óleo. Por outro lado, Liu et al. (2006) sintetizaram, pela primeira vez, nanofluidos de cobre em água através de um processo de redução química.

Com o objetivo de ter maior controle sobre os aspectos físicos mais relevantes dos nanofluidos (forma e tamanho das nanopartículas, estabilidade, homogeneidade, etc.), novos métodos de síntese estão sendo desenvolvidos, como por exemplo o empregado por Zhu et al. (2004) para obter nanopartículas de cobre em etileno glicol mediante redução de um tipo de sal ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) por exposição a microondas.

2.4. Caracterização dos nanofluidos

Como apresentado anteriormente, a maioria das pesquisas experimentais teve como objetivo a determinação da condutividade térmica dos nanofluidos. Uma revisão do material bibliográfico atual mostra que o incremento da condutividade térmica dos nanofluidos apresenta anomalias. Essa nova condutividade não pode ser predita mediante uma média da condutividade térmica dos componentes da mistura. Múltiplas pesquisas têm desenvolvido diferentes técnicas para medir a condutividade térmica dos nanofluidos e cada uma aportou somente no aumento da controvérsia. Uma das poucas conclusões de todas as pesquisas é que o fenômeno de intensificação da condutividade térmica depende de um grande número de parâmetros, tais como:

- Concentração volumétrica de nanopartículas
- Material das nanopartículas
- Tamanho das nanopartículas
- Forma das nanopartículas
- Fluido base
- Temperatura do nanofluido
- Aditivos
- Acidez
- Outros

Entretanto, a quantificação do efeito de cada um destes parâmetros sobre a intensificação das propriedades térmicas do nanofluido é ainda um tema de controvérsia. Com estes precedentes, é necessário realizar cuidadosamente os experimentos para medir

a condutividade térmica com um bom planejamento experimental que leve em conta a diversidade dos parâmetros envolvidos no fenômeno. Isto contribui para a validação dos muitos modelos teóricos propostos para a predição da condutividade térmica efetiva dos nanofluidos.

A medição da condutividade térmica de líquidos é um parâmetro importante no desenvolvimento da tecnologia para a caracterização dos nanofluidos. O princípio básico para a medição da condutividade térmica é a Lei de Fourier para condução de calor. No arranjo experimental mais simples, é necessário estabelecer um fluxo de calor unidimensional de valor conhecido e, dessa forma, medindo a temperatura em dois lugares diferentes ao longo da direção de transferência de calor, estimar a condutividade térmica segundo a equação:

$$k = \frac{q''/A}{\Delta T/L} \quad (2.1)$$

Onde q'' é o fluxo de calor, ΔT é a diferença de temperatura nos extremos do comprimento L e A representa a área da seção transversal.

Neste esquema de medição, a maior dificuldade reside em estabelecer um campo de temperaturas unidimensional. Ainda no caso de sólidos isotrópicos já é complicado ter esse tipo de configuração. Para o caso dos líquidos, é preciso evitar um gradiente de temperaturas na direção da gravidade. De outro lado, as correntes convectivas são mais um inconveniente a superar, pois produzem uma medida inexata da condutividade térmica. No caso dos nanofluidos, a presença das nanopartículas suspensas, a homogeneidade e a estabilidade das mesmas no fluido base representam o maior obstáculo no momento da medição. Por isto, a condutividade térmica dos nanofluidos (e dos fluidos em geral) pode ser medida com precisão se o tempo de medição for suficientemente pequeno para impedir o desenvolvimento da convecção. Assim, ao invés de aquecer o fluido desde a base, este é, convenientemente, aquecido desde a parte superior. Todas as considerações anteriores foram levadas em conta para a implementação dos diversos dispositivos de medição da condutividade térmica. Entre as técnicas de medição mais comuns, é possível encontrar as seguintes:

- Método do Fio Quente (Transient hot-wire technique)
- Método de Analisador de constantes térmicas
- Método da célula cilíndrica

- Método de oscilação da temperatura
- Método 3-Omega

No sentido da obtenção de uma caracterização completa do nanofluido, são importantes os aportes feitos para estabelecer condições e procedimentos padrões com um mínimo de variação entre as medições experimentais observadas na literatura.

Exemplo disto é o trabalho de Fonseca (2007), que realiza a medição da condutividade térmica, viscosidade e massa específica de nanofluidos por diferentes métodos e posteriormente as compara com as propriedades calculadas por modelos teóricos.

Em uma escala mais global, é importante destacar esforços como o INPBE (Exercício Internacional para a Avaliação Comparativa das Propriedades dos Nanofluidos), que mostra as diferenças entre as medições de condutividade térmica e viscosidade (realizadas em laboratórios de quase 30 instituições no mundo inteiro) a partir de amostras fornecidas por um provedor comum a fim de diminuir as divergências derivadas da síntese dos nanofluidos. Os resultados deste exercício se encontram no trabalho de Buongiorno et al. (2009) para a condutividade térmica, e no trabalho de Venerus et al. (2010) para a viscosidade.

2.5. Estimativa das propriedades intensificadas dos nanofluidos

Ao longo da pesquisa bibliográfica observou-se o grande número de pesquisas computacionais e experimentais focadas tanto na determinação experimental da condutividade térmica como na sua determinação por modelos preditivos. Este interesse inicial foi motivado pelas elevadas intensificações obtidas nesta propriedade, muito superiores a das outras propriedades. Posteriormente, e com a sofisticação do estudo do fenômeno em aplicações térmicas, teve-se um incremento das pesquisas relacionadas à convecção de nanofluidos sob diversas condições. A diversidade das pesquisas realizadas pode ser observada na Fig. 2.3, que mostra a quantidade de artigos relativos a cada objeto de estudo, seja o enfoque computacional ou experimental.

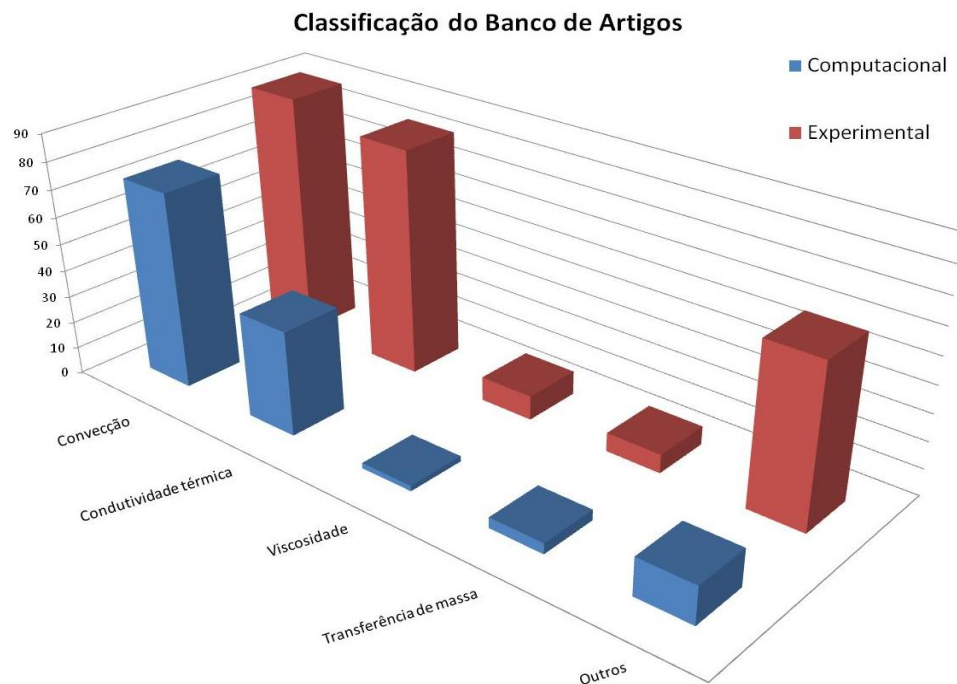


Figura 2.3. Classificação do banco de artigos.

2.5.1. Mecanismos de transporte de calor em nanofluidos

O conhecimento atual sobre a condutividade térmica efetiva de compostos misturados é derivada da hipótese do contínuo que tipicamente só incorpora a concentração volumétrica e a forma das nanopartículas como variáveis e assume o transporte de calor difusivo em ambas as fases, líquida e sólida. São desconsiderados os efeitos interfaciais e o deslocamento relativo das nanopartículas. Este enfoque, que consegue bons resultados em sistemas mili e micrométricos, falha no momento de descrever o fenômeno que ocorre na escala nanométrica.

A base da teoria macroscópica da transferência de calor em compostos é a equação de condução de calor de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.2)$$

Onde α é a difusividade térmica, e T representa um campo de temperaturas.

No sentido de determinar quais os fatores e de que forma eles influenciam no fenômeno do aumento da transferência de calor, e em especial da condutividade térmica, o trabalho de Koblinski et al. (2002) apresenta um grande aporte, pois destaca os novos mecanismos propostos por diferentes autores como efetivamente envolvidos no transporte da energia térmica em nanofluidos, sendo estes:

i) O movimento browniano:

É aquele que desloca as nanopartículas em suspensão através do fluido base, aumentando a probabilidade de colisão entre elas. Isto possibilitaria o transporte de calor direto de sólido para sólido entre uma e outra nanopartícula. Da Eq. (2.2) pode se observar que não são levados em conta os aspectos dinâmicos do movimento Browniano; é dizer, o considera um fluido estático.

Podemos associar o movimento Browniano com uma constante de difusão particular D_p , dada pela equação de Stokes-Einstein Eq. (2.3):

$$D_p = \frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}d_{np}} \quad (2.3.)$$

Onde k_B é a constante de Boltzmann, μ é a viscosidade e d_{np} o diâmetro da nanopartícula.

Usando esta constante é possível estimar o efeito do movimento Browniano sobre a condutividade térmica. São definidos dois tempos de resposta: o primeiro relaciona o tempo para deslocar uma nanopartícula a uma distância igual ao diâmetro dela:

$$\tau_D = \frac{d_{np}^2}{6D_p} \quad (2.4)$$

O segundo relaciona o tempo requerido para transportar calor através do líquido na mesma distância:

$$\tau_H = \frac{d_{np}^2}{6\alpha} = \frac{d_{np}^2 (c_p \rho)_{fb}}{6k_{fb}} \quad (2.5)$$

Para condição ambiente, sendo a água o fluido base ($\mu = 0,001 \text{ kg/cm-s}$, $k_{fb} = 0,4 \text{ W/m-K}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 4,2 \text{ kJ/kg-K}$) e com nanopartículas de $d_{np} = 10 \text{ nm}$, as Eqs. (2.4) e (2.5) dão como resultado os valores de $\tau_D = 2 \times 10^{-7}$ e $\tau_H = 4 \times 10^{-10} \text{ s}$, respectivamente. A razão neste caso é $\tau_D/\tau_H = 500$, e diminui a um valor de 25 quando o tamanho de nanopartícula chega a valores atômicos (0,5 nm). Estes valores dão uma medida da desproporção entre a difusão térmica no fluido base e a difusão provocada pelo movimento Browniano, inclusive em nanopartículas extremamente pequenas.

No entanto, mesmo que a contribuição do movimento Browniano no deslocamento das nanopartículas (e como consequência à difusão de calor por contato) seja reduzida, ainda

está em estudo à provável contribuição ao fenômeno de aglomeração de nanopartículas, tendo como resultado a formação de *clusters*. Cabe destacar que outra das possíveis contribuições do movimento Browniano seja a obtenção de uma melhor mistura no fluido, especialmente nas regiões frias e quentes, reduzindo o gradiente local de temperatura em todo o fluido (Koo e Kleinstreuer, 2005). O aprofundamento das pesquisas neste sentido requer cálculos baseados em um prévio conhecimento da dinâmica molecular.

ii) A natureza do transporte de calor

A teoria macroscópica de transferência de calor assume que esta é realizada por difusão. No entanto, em sólidos cristalinos, o calor é transportado mediante fônons. Isto é, pela propagação das vibrações reticulares (estruturas moleculares) que são geradas e propagadas aleatoriamente. Quando o tamanho das nanopartículas em um nanofluido é menor que o caminho livre médio dos fônons, a energia passa a transportar-se balisticamente. Para nanopartículas de alumina a temperatura ambiente, por exemplo, o caminho livre médio é aproximadamente 35nm. Neste ponto, enfoques macroscópicos como o empregado por Maxwell ou Hamilton & Crosser não podem ser aplicados e se faz necessário um tratamento teórico baseado no transporte balístico de fônons (maior informação em Joshi e Majumdar, 1993).

Neste sentido, ainda é difícil vislumbrar a forma em que o transporte balístico de fônons é mais efetivo que o transporte difusivo, e dessa maneira explicar as intensificações na condutividade térmica dos nanofluidos. Em particular, para ambos os transportes difusivo e balístico, a temperatura das nanopartículas representa uma grande influência, operando como condição de contorno para o fluxo de calor em um líquido de baixa condutividade.

iii) A formação de uma camada interfacial

Têm sido encontradas múltiplas pesquisas sobre o efeito da resistência térmica interfacial, produto do leve contato entre as fases sólida e líquida do nanofluido (Ni; Gu; Chen, 1997). Esta resistência, denominada *resistência de Kapitza*, aparece como um obstáculo para o fluxo de calor na interface, que é sustentado na teoria de condução de energia mediante fônons. Contudo, o uso desta resistência como parâmetro para a intensificação da condutividade leva a resultados superestimados e com tendências a diminuir com a redução do tamanho das nanopartículas, o que é claramente contrário aos resultados das pesquisas experimentais (Kebinski et al., 2002).

Em contraste, apresenta-se outro fenômeno produzido na interface sólido-líquido: a formação de uma camada de fluido ao redor da nanopartícula, denominada *nanocamada*. É

evidente que a estrutura atômica das nanopartículas é muito mais ordenada que a estrutura molecular do fluido base. Justamente na interface de ambas as fases é desenvolvido um arranjo das moléculas do fluido base. O efeito desta nova nanocamada pode ser dividido em dois aspectos:

- Por um lado, o estado quase-sólido da nanocamada (com as moléculas do fluido base detidas na superfície da nanopartícula) leva a pensar que a condutividade térmica daquela estará em uma faixa determinada pela condutividade do fluido base e a da nanopartícula.
- Por outro lado, a formação da *nanocamada* contribui no aumento *aparente* da concentração volumétrica das nanopartículas. Desse modo, desconsiderando o caso mais otimista que é quando a nanocamada apresenta a mesma condutividade da nanopartícula, se terá uma intensificação só pelo fato de ter-se formado a nanocamada.

Assim, por exemplo, para dobrar o volume efetivo V_{eff} de uma nanopartícula com diâmetro $d_{\text{np}} = 10 \text{ nm}$ é requerida uma espessura de nanocamada igual a $t_{\text{nc}} = 2,5 \text{ nm}$. Cálculos baseados nestas considerações são mostrados na Fig. 2.4.

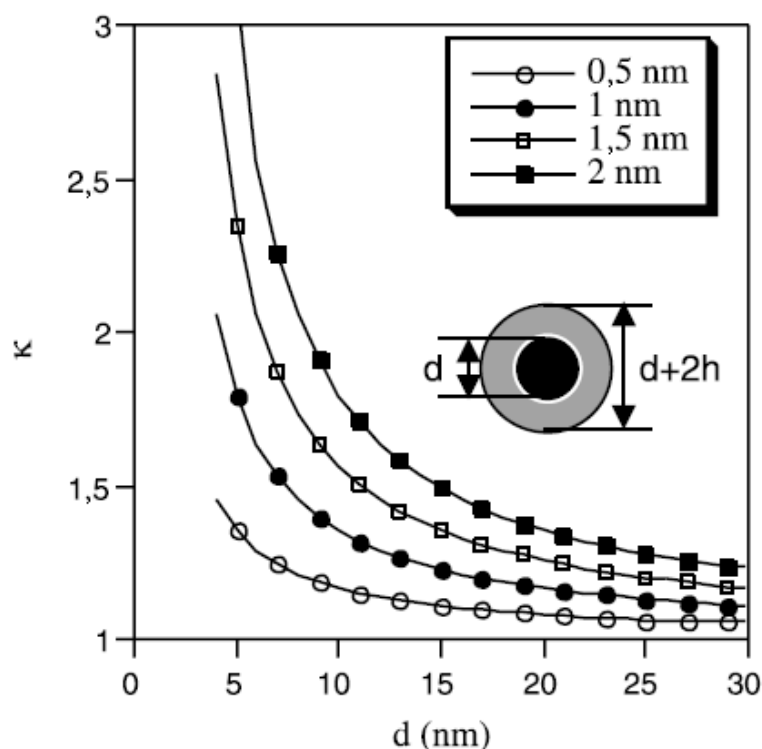


Figura 2.4 Efeito sobre a condutividade relativa $k = k_{nf}/k_{fb}$ em relação com a espessura da nanocamada e o diâmetro da nanopartícula. Fonte: Keblinski et al. (2002);

Xue (2003) analisou resultados experimentais para nanofluidos baseados em alumina (Al_2O_3) para obter valores específicos de espessura e condutividade da nanocamada. Uma análise similar foi desenvolvida por Yu e Choi (2003) com resultados concordantes.

No entanto, outros experimentos (Yu et al., 2003) e simulações (Henderson; van Swol, 1984) apontam que a espessura da nanocamada não supera o valor de uns poucos diâmetros atômicos (aproximadamente 1nm). Apesar de ter, aparentemente, uma grande influência na intensificação da condutividade, esta não seria o único fator relevante para atingir os valores obtidos experimentalmente.

iv) O efeito da aglomeração das nanopartículas

A aglomeração das nanopartículas, ao invés da coalescência, pode representar uma vantagem para a transferência de calor por condução. Se as nanopartículas puderem aglomerar-se em estruturas identificadas como *redes de percolação* de calor, seriam criados caminhos de baixa resistência térmica, o que contribuiria para o aumento da condutividade térmica efetiva.

É natural pensar que a aglomeração de nanopartículas será maior quanto maior seja o número destas. Isto é, o efeito da formação de aglomerações (*clusters* em inglês) será intensificado em altas concentrações de nanopartículas. Como consequência também se terá uma menor distância entre os chamados clusters, com a tendência de formar as *redes de percolação*. Como efeito negativo, também é esperado que a formação destes *clusters* aumente a probabilidade de sedimentação das nanopartículas.

Segundo Eastman et al. (2004), é possível achar este tipo de estruturas em sistemas dispersos de mais de 15% de concentração volumétrica. Por outro lado, a intensificação da condutividade térmica dos nanofluidos ocorre a concentrações muito baixas (na ordem de 1% e menores). Desde essa perspectiva, pareceria que a formação de uma estrutura do tipo *rede de percolação* não ocorre em nanofluidos. Porém, a aglomeração local é possível. O volume efetivo de um cluster pode ser muito maior que o volume somado das nanopartículas.

Na Fig. 2.5 pode ser visualizado o efeito de intensificação da condutividade térmica ocasionada pelo incremento efetivo do volume da fase mais condutiva em função de um parâmetro Φ (razão de empacotamento: entre o volume das nanopartículas dentro do *cluster* e o volume total efetivo do *cluster*). Com uma diminuição da razão de empacotamento, o volume efetivo dos clusters se incrementa, e também a condutividade térmica. Dessa maneira, para um *cluster* de nanopartículas esféricas extremamente próximas, aproximadamente 25% de seu volume é o fluido base entre elas, o que eleva o volume

efetivo da fase mais condutiva em quase 30% em relação ao sistema disperso simples (Eastman et al., 2004).

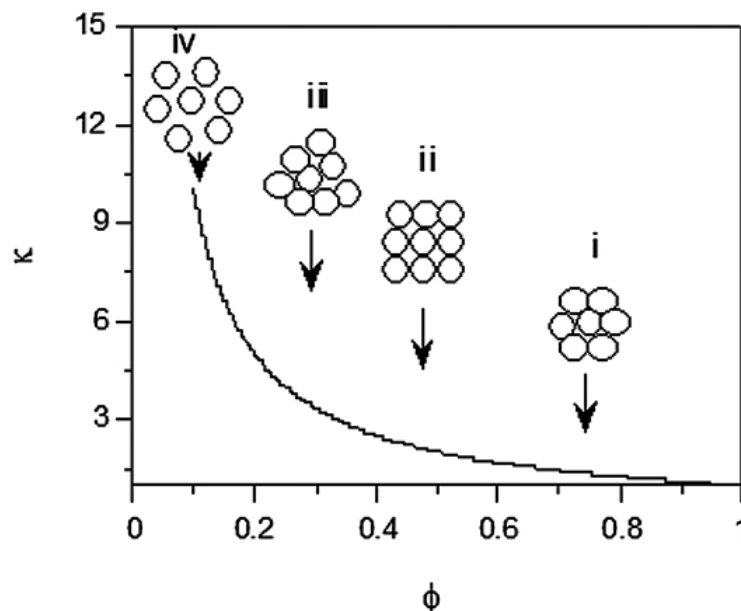


Figura 2.5. Incremento da condutividade térmica versus a razão de empacotamento Φ . Os diagramas esquemáticos indicam arranjos: i) cúbico de faces centradas (FCC), ii) cúbico simples, iii) estrutura irregular espalhada, com contato de nanopartículas, e iv) espalhado pelas camadas de fluido. Fonte: Keblinski et al. (2002).

Observa-se que não é necessário o contato direto entre nanopartículas para intensificar o fenômeno de transferência de calor, apenas uma proximidade que permita o aumento da velocidade do fluxo de calor entre aquelas. Esses clusters com baixa *razão de empacotamento*, e conseqüentemente um maior volume, são capazes de explicar os incrementos da condutividade térmica. Inclusive, parece que a transferência de calor do tipo balístico persistiria nos clusters formados, devido a que o caminho livre médio para os fônons é menor na fase líquida do que na nanopartícula (Eastman et al., 2004).

Em relação à modelagem teórica, Wang et al. (2003) realizaram uma análise mais detalhada dos efeitos da aglomeração em termos de suas propriedades fractais e concluíram que tais efeitos podem explicar a intensificação das propriedades térmicas em nanofluidos que contêm nanopartículas de óxidos metálicos. Porém, não conseguem explicar os maiores incrementos observados para nanopartículas metálicas.

Apesar de ter se desenvolvido numerosas pesquisas teóricas e experimentais na tentativa de validar cada um dos mecanismos descritos anteriormente, ainda existe muita controvérsia sobre quais destes fatores são os governantes no fenômeno. Na maioria dos modelos considerados neste trabalho, que serão abordados mais adiante, as correlações

desenvolvidas dependem de parâmetros que levam em conta pelo menos um dos quatro mecanismos mencionados, além de outros determinados experimentalmente.

2.5.2. Correlações teóricas para determinar a condutividade térmica de nanofluidos

A busca de tecnologias que permitam a aplicação de nanofluidos em processos industriais e novas tecnologias tem aumentado nestes últimos anos. Discussões sobre os mecanismos de transferência de calor em nanofluidos serviram para aumentar o interesse dos cientistas para desenvolver correlações e modelos preditivos para este fenômeno. Desse modo, como já foi dito anteriormente, ainda é motivo de discussão quais mecanismos governam o incremento da condutividade térmica.

A previsão teórica e alguns resultados experimentais mostram que os primeiros fatores que influenciam no aumento da condutividade térmica são: o tamanho e a forma da partícula, a relação comprimento-diâmetro (*razão de aspecto*), o tempo de homogeneização e a fração volumétrica da fase dispersa. Entretanto, a presença de dispersantes para as nanopartículas parece influenciar negativamente este parâmetro.

O estudo pioneiro feito por Maxwell (1873) considerava o fenômeno de condução, sob o enfoque do transporte de calor macroscópico, para uma suspensão diluída de partículas esféricas e desprezando as interações entre elas. A equação de Maxwell, obtida como solução da equação de Laplace para um campo de temperatura ao redor da partícula, é a seguinte:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.6)$$

Onde k representa a condutividade térmica; ϕ , concentração volumétrica; e os índices nf , np e fb , representam nanofluido, nanopartícula e fluido base, respectivamente.

O enfoque de transferência de calor macroscópica empregado parece ser efetivo em sistemas particulados de escala milimétrica a micrométrica. Porém, em misturas que usam nanopartículas, tais correlações não conseguem calcular os valores de intensificação achados experimentalmente.

Observa-se que a Eq. 2.6 tem como únicas variáveis as condutividades de ambas as fases do nanofluido e a concentração das nanopartículas. Inclusive, para valores muito elevados de condutividade térmica das nanopartículas (isto é: $k_{np} \gg k_{fb}$), a intensificação da condutividade do nanofluido é apenas função da concentração volumétrica. Fisicamente, este comportamento é explicado pelo fato que a temperatura através da nanopartícula

permanece constante, dando como resultado a mesma condição de contorno para a equação de fluxo de calor no líquido envolvente.

Desta pequena análise se infere que a condutividade térmica dos nanofluidos calculada pela equação de Maxwell é independente da composição das nanopartículas, o qual não é refletido nos experimentos desenvolvidos.

A Fig. 2.6 mostra a divergência entre alguns resultados experimentais e valores de condutividade calculados com uso do modelo de Maxwell.

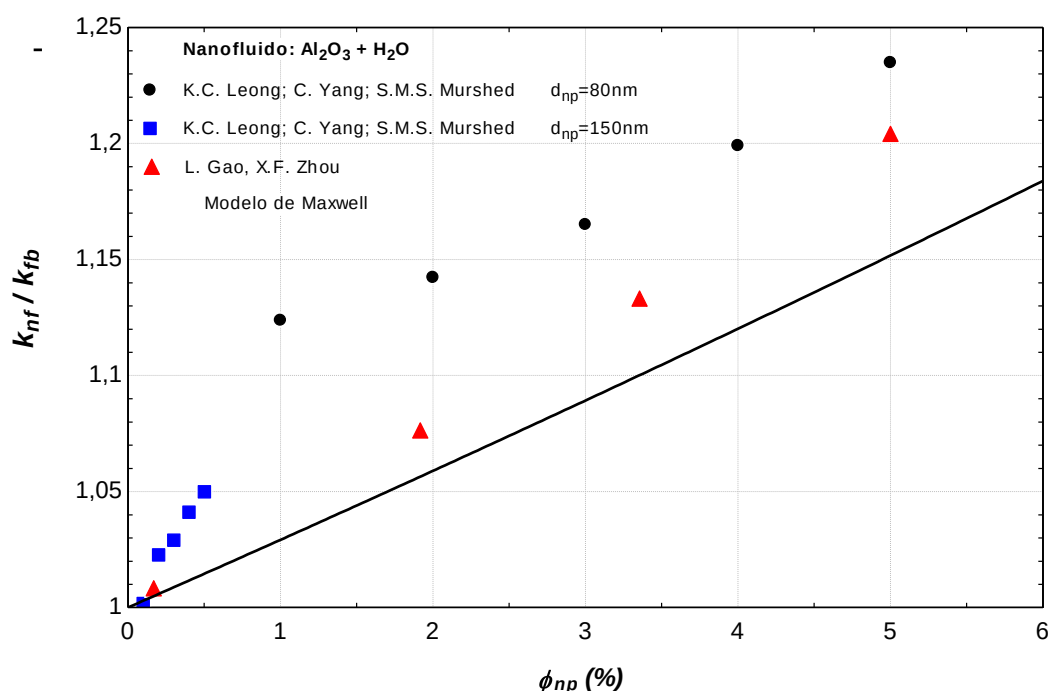


Figura 2.6. Comparação dos valores calculados com o modelo de Maxwell e dados experimentais.

É conveniente destacar que os dados experimentais mostrados na Fig. 2.6 são muito conservadores, pois tem se comprovado experimentalmente intensificações de até 160% com nanofluidos de nanotubos de carbono suspensos em óleo (Choi et al., 2001).

A maioria dos modelos desenvolvidos posteriormente foi baseada neste primeiro modelo, com apenas algumas considerações a mais, tais como a forma da partícula (Fricke, 1924; Hamilton & Crosser, 1962; Granqvist & Hunderi, 1978; Xue, 2000), distribuição particular (Wiener, 1912), estrutura partícula-camada (Kerner, 1956, Lamb et al. 1978), resistência de contacto (Benvensite, 1987), entre outros. Estes modelos podem ser agrupados como modelos clássicos, cujas principais referências são: a Teoria do Meio Efetivo, as considerações de condutividade anisotrópica em nanopartículas esféricas ou não esféricas, distribuição das nanopartículas no fluido base, entre outras.

Dentre os modelos clássicos, o modelo de Hamilton-Crosser (1962) tem mostrado uma maior contribuição, pois considera um parâmetro que avalia a forma da partícula. Este modelo é atualmente usado para comparar alguns resultados experimentais. A equação vem dada por:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3 \psi^{-1} \phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.7)$$

Onde ψ representa o parâmetro de esfericidade da nanopartícula. Para nanopartículas esféricas $\psi = 1$.

Neste modelo, o tamanho da partícula é praticamente desconsiderado. Só o parâmetro de forma e a concentração volumétrica representam fatores relevantes. O fator de forma da Eq. (2.7) de HC relaciona a área superficial da nanopartícula com a mesma área para uma partícula esférica com igual volume. A independência da condutividade calculada em relação com o tamanho das nanopartículas é inconsistente com os resultados de pesquisas experimentais. Resumidamente, alguns dos modelos clássicos de maior destaque são mostrados na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Modelos clássicos para o cálculo da condutividade térmica efetiva de suspensões sólido/líquido.

Autor (ano)	Expressão	Observações
Maxwell (1873)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})}$	Partículas esféricas são consideradas
Rayleigh (1892)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \left(1 + 3,939\phi_{np}^{\frac{7}{3}} \frac{k_{np} - k_{fb}}{4k_{fb} + 3k_{np}}\right)(k_{np} - k_{fb})}$	Partículas esféricas. Fator de correção ao modelo de Maxwell.
Wiener (1912)	$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + (m + 1)\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{mk_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})}$	O parâmetro 'm' é definido para $0 \leq m$
Bruggeman (1935)	$1 - \phi_{np} = \frac{k_{np} - k_{nf}}{k_{np} - k_{fb}} \left(\frac{k_{fb}}{k_{np}}\right)^{1/3}$	Para partículas esféricas
Hamilton – Crosser (1962)	$k_{nf} = k_{fb} + 3 \psi^{-1} \phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb}$	Partículas não esféricas. Com parâmetro de esfericidade (ψ)

Com o objetivo de mensurar a diferença entre cada modelo clássico referenciado, foram calculados os valores de condutividade térmica para cada um deles em uma faixa

representativa de concentrações volumétricas. O nanofluido considerado foi de nanopartículas de alumina em água ($k_{np} = 42 \text{ W/m-K}$ e $k_{fb} = 0,6 \text{ W/m-K}$). Os resultados são apresentados na Fig. 2.7. É importante destacar que os resultados obtidos para os modelos de Maxwell e Rayleigh são praticamente iguais na faixa estabelecida (de 0% a 5% de concentração volumétrica). Na figura em destaque, observa-se que os modelos são muito próximos em baixas concentrações volumétricas.

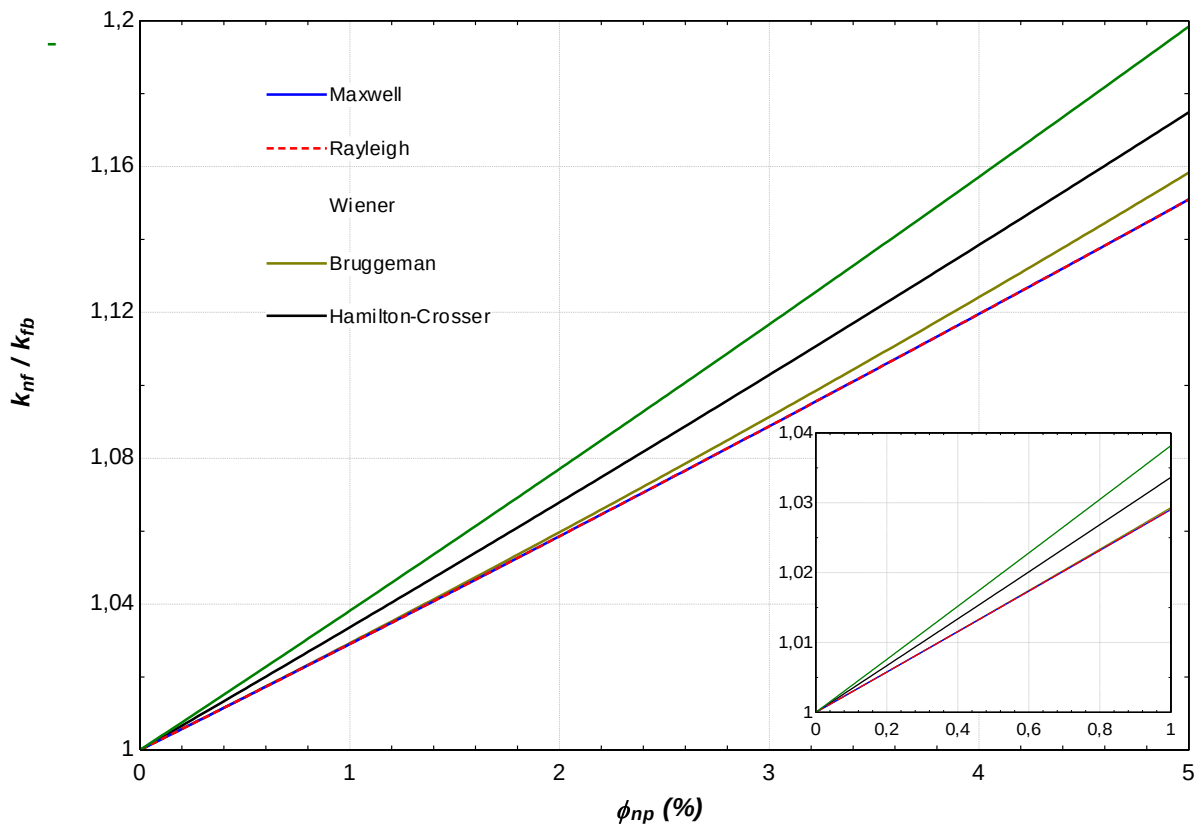


Figura 2.7 – Valores de intensificação da condutividade térmica usando os modelos clássicos das referências.

Também foram desenvolvidos modelos teóricos que consideravam a presença da denominada nanocamada como fator influente, não só como parte de uma partícula complexa, mas também com propriedades diferenciadas dos outros componentes do nanofluido.

Nesse sentido, e para considerar a existência da nanocamada (esquemáticamente representada na Fig. 2.8), Yu e Choi (2003) assumiram nanopartículas esféricas de raio definido r , envolvida por uma nanocamada de espessura t_{nc} .

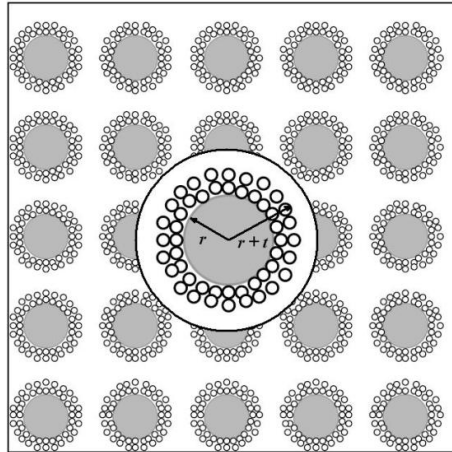


Figura 2.8 – Representação esquemática da nanocamada interfacial em um arranjo de nanopartículas. Fonte: Yu e Choi (2003)

Esta nanocamada possui condutividade térmica diferente k_{nc} , maior que a condutividade do fluido base (k_{fb}) e menor que a da nanopartícula (k_{np}). Da união da nanocamada e a nanopartícula é formada uma *nanopartícula equivalente*, com condutividade térmica equivalente k_{eq} . Esta condutividade equivalente vem dada pela Eq. (2.8):

$$k_{eq} = \frac{[2(1-\varepsilon)+(1+\beta)^3(1+2\varepsilon)]\varepsilon}{-(1-\varepsilon)+(1+\beta)^3(1+2\varepsilon)} k_{np} \quad (2.8)$$

Onde $\beta = t/r_{np}$, é a razão entre a espessura da nanocamada e o raio da nanopartícula; e $\varepsilon = k_{nc}/k_{np}$, é a razão entre as condutividades da nanocamada e a nanopartícula. O limite superior estará definido para a condição $\varepsilon = 1$, isto é, quando a condutividade da nanocamada for igual à da nanopartícula.

Finalmente, a condutividade efetiva do nanofluido será dada pela Eq. (2.9):

$$k_{nf} = \frac{k_{eq} + 2k_{fb} + 2\phi_{np}(k_{np} - k_{fb})(1+\beta)^3}{k_{eq} + 2k_{fb} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})(1+\beta)^3} k_{fb} \quad (2.9)$$

A dificuldade da utilização deste modelo é que o valor da condutividade da nanocamada deve ser conhecido com antecedência.

Para esse fim, alguns autores como Xie et al. (2005) apresentam uma proposta de cálculo da condutividade térmica da nanocamada e a condutividade térmica efetiva da estrutura nanocamada-nanopartícula. Segundo os autores, a condutividade térmica da nanocamada é dada pela Eq. (2.10):

$$k_{nc} = \frac{M^2}{(M-\beta)Ln(1+M)+\beta M} \quad (2.10)$$

Onde: $M = \varepsilon_p(1 + \beta)$, com $\varepsilon_p = k_{np}/k_{fb}$ e $\beta = t/r_{np}$.

Este modelo inclui parâmetros como: $\phi_{pc} = \phi_{np}(1 + \beta)^3$; $\varepsilon_{fl} = \frac{k_{fb}-k_{nc}}{k_{fb}+2k_{nc}}$; $\varepsilon_{pl} = \frac{k_{np}-k_{nc}}{k_{np}+2k_{nc}}$;

$$\varepsilon_{lf} = \frac{k_{nc}-k_{fb}}{k_{nc}+2k_{fb}}. \text{ Estes parâmetros são combinados em } \theta = \varepsilon_{lf} \left[\frac{(1+\beta)^3 - \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{fl}}}{(1+\beta)^3 + 2\varepsilon_{lf}\varepsilon_{pl}} \right]$$

A forma do modelo de Xie, relacionando todos os parâmetros descritos anteriormente, está dada na Eq. (2.11):

$$k_{nf} = 1 + 3\theta\phi_{pc} + 3\theta^2 \left[\frac{\phi_{pc}^2}{1-\theta\phi_{pc}} \right] \quad (2.11)$$

O trabalho de Xue e Xu (2005) também desenvolve uma correlação, mostrada na Eq. (2.12), relacionando a geometria da nova estrutura nanocamada-nanopartícula e as propriedades de cada componente.

$$\left[1 - \frac{\phi_{np}}{\tau} \right] \left[\frac{k_{nf}-k_{fb}}{2k_{nf}+k_{fb}} \right] + \frac{\phi_{np}}{\tau} \left[\frac{(k_{nf}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{np})-\tau(k_{np}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{nf})}{(2k_{nf}+k_{nc})(2k_{nc}+k_{np})+2\tau(k_{np}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{nf})} \right] = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Onde } \tau = \left(\frac{r_{np}}{r_{np}+t} \right)^3$$

Leong et al. (2006) propuseram outro modelo teórico de determinação de condutividade, mostrado na Eq. (2.13):

$$k_{nf} = \frac{\phi_{np}k_{nc}(k_{np}-k_{nc})(2\gamma_1^3-\gamma^3+1)+\gamma_1^3(k_{np}+2k_{nc})[\phi_{np}\gamma^3(k_{nc}-k_{fb})+k_{fb}]}{\gamma_1^3(k_{np}+2k_{nc})-\phi_{np}(k_{np}-k_{nc})(\gamma_1^3+\gamma^3-1)} \quad (2.13)$$

Onde $\gamma = 1 + \beta$; $\gamma_1 = 1 + \frac{\beta}{2}$; neste caso, o valor de condutividade da nanocamada é estabelecido por $k_{nc} = 3k_{fb}$.

É importante destacar que os modelos apresentados até este ponto levam em conta considerações sobre os componentes do nanofluido, a presença da nanocamada e as propriedades de todos eles. Isto é, sempre mantendo o enfoque nos aspectos morfológicos e composição dos nanofluidos.

Diversos autores consideraram o efeito das aglomerações (ou formação de clusters) para o cálculo da intensificação da condutividade térmica. Assim, Wang et al. (2003) definiram uma função de distribuição do raio de clusters $n(r)$, estimado a partir de uma distribuição normal, da forma mostrada na Eq. (2.14).

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(Ln\sigma)r}} e^{-\left[\frac{Ln\left(\frac{r}{r_{np}}\right)}{\sqrt{2\pi(Ln\sigma)}}\right]^2} \quad (2.14)$$

Com o desvio padrão $\sigma = 1,5$ (Wang et al., 2003)

Finalmente, o modelo de Wang é dado pela Eq. (2.15):

$$k_{nf} = \frac{(1-\phi_{np}) + 3\phi_{np} \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{fb}} n(r) dr}{\int_0^\infty \frac{k_{fb}(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{fb}} dr} k_{fb} \quad (2.15)$$

Em trabalho posterior, Prasher et al. (2006a) apresentaram a correlação mostrada na Eq. (2.16), que considera a aglomeração das nanopartículas como principal mecanismo para o incremento da condutividade térmica.

$$k_{nf} = k_{fb} + 3 \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}}\right)^{3d_f} \phi_{np} \frac{k_{cl} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{cl} - \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}}\right)^{3d_f} \phi_{np} k_{cl} - k_{fb}} k_{fb} \quad (2.16)$$

Onde a condutividade do cluster k_{cl} é determinada da relação mostrada na Eq. (2.17):

$$\left[1 - \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}}\right)^{3d_f}\right] \frac{k_{fb} - k_{cl}}{2k_{cl} - k_{fb}} + \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}}\right)^{3d_f} \frac{k_{np} - k_{cl}}{2k_{cl} - k_{np}} = 0 \quad (2.17)$$

Onde d_f representa a dimensão fractal do agregado, que se encontra na faixa de $1,75 \leq d_f \leq 2,5$

Outro dos mecanismos propostos que poderiam influenciar o aumento da condutividade térmica, e sobre o qual tem se desenvolvido inúmeras pesquisas, é o movimento Browniano. Nesse sentido, Xuan; Li; Hu (2003) propuseram que a intensificação da condutividade devida ao movimento Browniano vem dada pela Eq. (2.18).

$$k_{nf,MB} = \frac{1}{2} \rho_p (C_p)_{np} \phi_{np} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}r_{cl}}} \quad (2.18)$$

Onde r_{cl} representa o raio de giro do cluster, que é determinado experimentalmente.

Por outro lado, Jang e Choi (2004) desenvolveram também um modelo que inclui o efeito da convecção provocada por uma única nanopartícula. O modelo, mostrado na Eq. (2.19) pode ser considerado uma ampliação da regra de misturas. Maiores detalhes em Zhou et al. (2010).

$$k_{nf} = (1 - \phi_{np}) k_{fb} + \phi_{np} k_{np} + 3C \left(\frac{r_{fb}}{r_{np}} \right) \phi_{np} \left(\frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb} v_{fb} l_{fb}} \right)^2 Pr k_{fb} \quad (2.19)$$

Onde l_{fb} representa o caminho médio livre das moléculas do fluido base, e C um parâmetro empírico.

No entanto, alguns autores (dentre eles, Prasher) criticaram este modelo pela inconsistência das unidades do termo dinâmico; sem desmerecer a consideração de fatores estáticos e dinâmicos sobre a condutividade térmica efetiva do nanofluido.

Por sua vez, Koo e Kleinstreuer (2005) propuseram a Eq. (2.20) para modelar a condutividade térmica que é produto da influência do movimento Browniano. A introdução deste termo é considerada como complemento ao modelo de Maxwell.

$$k_{nf,MB} = 5 \times 10^4 \beta \rho_{fb} (C_p)_{fb} \phi_{np} \sqrt{\frac{k_B T}{2\rho_{np} r_{np}}} \left[(-134,63 + 1722,3\phi_{np}) + (0,4705 - 6,04\phi_{np}) T \right] \quad (2.20)$$

$$\text{Com } \beta = \begin{cases} 0,0137 (100\phi_{np})^{-0,8229} & ; \phi_{np} > 0,01 \\ 0,0011 (100\phi_{np})^{-0,7272} & ; \phi_{np} < 0,01 \end{cases}$$

A proposta de Prasher et al. (2006b) sobre a contribuição do movimento Browniano é mostrada na Eq. (2.21). Este modelo é uma modificação do modelo de Maxwell e leva em conta o efeito da resistência de contato k_{np}^R .

$$k_{nf} = \left[1 + C \phi_{np} \left(\frac{9k_B T}{\pi \rho_{np} \phi_{fb}^2 r_{np}} \right)^m Pr^{0,333} \right] \left[k_{fb} + 3\phi_{np} \frac{k_{np}^R}{2k_{fb} + k_{np}^R - \phi_{np}(k_{np}^R - k_{fb})} \right] \quad (2.21)$$

Onde C e m são parâmetros determinados empiricamente.

Como já mencionado na descrição dos novos mecanismos que Keblinski et al. (2002) consideraram relevantes para a intensificação da condutividade térmica em nanofluidos, tudo parece apontar que o movimento Browniano não seria o único fator governante no

fenômeno, mas uma combinação (em maior ou menor grau) de cada um dos mecanismos apresentados.

Essa perspectiva foi adotada em trabalho recente por Murshed; Leong; Yang (2008), que consideram que a condutividade térmica intensificada dos nanofluidos pode se dividir em duas componentes diferenciadas, denominadas *condutividade térmica estática* e *condutividade térmica dinâmica*. A forma da Eq. (2.22) é recorrente em muitas das pesquisas que consideram a interação entre nanopartículas e sua movimentação:

$$k_{nf} = k_{nf,estática} + k_{nf,dinâmica} \quad (2.22)$$

A primeira componente considera o nanofluido em estado estacionário e normalmente é representada pelos modelos clássicos baseados na Teoria do meio efetivo e outros fatores a mais, como: a presença da nanocamada, distribuição das nanopartículas, etc.

A segunda componente leva em conta aspectos de locomoção das nanopartículas, principalmente o movimento Browniano. Neste aspecto, ainda persiste a controvérsia sobre a real magnitude da contribuição do movimento Browniano à intensificação da condutividade térmica. Existem autores como Wang (2003); Xue (2003); e Keblinski et al. (2002) que mostraram sua pouca influência para o transporte de energia térmica. Por outro lado, pesquisadores como Li e Peterson (2007) ou Kumar et al. (2004) afirmam que o movimento browniano é muito importante na intensificação da condutividade térmica.

2.5.3. Correlações teóricas para determinar a viscosidade de nanofluidos

Outra das propriedades importantes para a aplicação prática dos nanofluidos é a viscosidade, que devido à presença das nanopartículas sofre uma alteração com relação à viscosidade do fluido base. Um nanofluido mais viscoso requer uma maior potência de bombeamento para escoar, sob as mesmas condições de operação que um fluido de trabalho convencional.

Einstein (1906) foi o primeiro a desenvolver uma correlação sobre o aumento da viscosidade de suspensões, que é representada pela Eq. (2.23).

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np}) \quad (2.23)$$

Onde μ representa a viscosidade e os índices se mantêm.

O modelo de Einstein serviu como base para modelos posteriores como Bruijn (1942), Vand (1948), Brinkmann (1952), mostrados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3. Modelos teóricos para a determinação da viscosidade efetiva dos nanofluidos.

Autor (ano)	Modelo
Einstein (1906)	$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np})$
Bruijin (1942)	$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{1 - 2,5\phi_{np} + 1,552\phi_{np}^2}$
Vand (1948)	$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np} + 7,349\phi_{np}^2)$
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{(1 + \phi_{np})^{2,5}}$
Batchelor (1977)	$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np} + 6,5\phi_{np}^2)$

Destaca-se dentre eles o modelo de Batchelor (1977), Eq. (2.24):

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np} + 6,5\phi_{np}^2) \quad (2.24)$$

Entretanto, utilizando este modelo acontece o mesmo que com a condutividade térmica: os resultados experimentais ultrapassam grandemente os valores estimados. Assim foi evidenciado por Chevallier; Tillement; Ayela (2007), que mediram a viscosidade de nanofluidos de óxido de silício (SiO_2) em etanol. Eles mediram viscosidades de quase o dobro para concentrações relativamente baixas. Por outro lado, o trabalho desenvolvido por Phuoc e Massoudi (2008), deu como resultado valores de viscosidade relativa na mesma ordem para nanofluidos de óxido de ferro em água.

Apesar dos muitos modelos desenvolvidos para a condutividade térmica e a viscosidade, da comparação com dados experimentais ainda não é possível concluir qual deles descreve realmente os fenômenos térmico e hidrodinâmico dos nanofluidos. É importante destacar que o modelo de Batchelor é o mais referenciado, dentre os modelos convencionais para a viscosidade de nanofluidos.

2.5.4. Correlações teóricas para outras propriedades de nanofluidos

Geralmente, o processamento dos dados experimentais para convecção forçada de nanofluidos começa conhecendo as propriedades modificadas dos nanofluidos e aplicando algumas correlações conhecidas para transferência de calor em escoamento interno. As Eqs. (2.25) e (2.26) determinam as propriedades específicas para substâncias com múltiplos

componentes e são baseadas no princípio físico da regra de misturas (maiores detalhes sobre estes aspectos, em Zhou et al., 2010).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_{np})\rho_{fb} + \phi_{np}\rho_{np} \quad (2.25)$$

$$\rho_{nf}(C_p)_{nf} = (1 - \phi_{np})\rho_{fb}(C_p)_{fb} + \phi_{np}\rho_{np}(C_p)_{np} \quad (2.26)$$

Onde ρ é massa específica, C_p é o calor específico da substância, ϕ é a concentração volumétrica, e os índices nf , np e fb representam nanofluido, nanopartícula e fluido base, respectivamente.

2.6. Convecção forçada em escoamento interno

A transferência de calor por convecção faz referência à transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre essa superfície. Dentro do fenômeno convectivo estão incluídos os efeitos do movimento global do fluido (advecção) e do movimento aleatório das moléculas do fluido (condução ou difusão).

Os fluidos (líquidos ou gases) utilizados em aplicações de resfriamento são geralmente forçados a escoar mediante um ventilador ou uma bomba através de uma tubulação que seja o suficientemente longa para conseguir a transferência de calor desejada. Em um escoamento interno, o fluido está completamente confinado pelas superfícies internas da tubulação, o que constitui um limite para o crescimento da camada limite.

A maioria dos líquidos em processos térmicos é transportada em tubos (de seção transversal circular) para obter uma menor perda de carga e a melhor transferência de calor na superfície. Enquanto para os gases é preferível o uso de dutos de seção não circular, onde a perda de carga não é tão pronunciada.

Apesar de existirem diversas teorias sobre o escoamento de fluidos, soluções teóricas são obtidas apenas para um reduzido número de casos simples, como o escoamento totalmente desenvolvido em uma tubulação reta de seção circular. Portanto, são necessários resultados experimentais para o maior número de escoamentos possíveis e, assim, obter correlações empíricas em substituição as soluções analíticas. No entanto, sendo estes experimentos realizados em condições controladas e pelo fato de dois

experimentos não serem exatamente iguais, é comum obter um erro na ordem de 10% para cálculos de coeficientes de atrito ou convecção (ver Incropera, 2008).

É importante mencionar que o atrito entre as camadas de fluido pode causar um incremento na temperatura do fluido. Porém, tal incremento é mínimo e poder ser desconsiderado em aplicações de troca de calor. A principal consequência do atrito é a perda de carga. Daí que é válida a hipótese de que toda variação da temperatura do fluido é causada pela transferência de calor.

Na maior parte das aplicações práticas, o escoamento dentro de um duto ou tubulação pode ser considerado unidimensional. Como resultado, todas as propriedades são uniformes em qualquer seção transversal normal à direção do escoamento, quando assumidas para valores volumétricos médios. Se o regime for permanente, estas propriedades serão também constantes no tempo.

2.6.1. Considerações hidrodinâmicas e térmicas

Pela geometria do problema, a velocidade do fluido varia desde zero (na zona próxima às paredes), até um valor máximo (localizado no centro do tubo). Daí que é conveniente trabalhar com uma velocidade média que permaneça constante para um fluido incompressível e um tubo de seção transversal constante.

A determinação do valor da velocidade média u_m em uma tubulação é baseada no princípio de conservação da massa, o que vem dado na Eq. (2.27).

$$\dot{m} = \rho u_m A_C = \int_{A_C} \rho u_{(r,x)} dA_C \quad (2.27)$$

Onde $\dot{m}$ é a vazão mássica; ρ , a massa específica do fluido; A_C , a área da seção transversal e $u_{(r,x)}$, o perfil de velocidade.

Para um escoamento incompressível em um tubo de seção circular de raio R , a velocidade média é dada pela Eq. (2.28):

$$u_m = \frac{\int_{A_C} \rho u_{(r,x)} dA_C}{\rho A_C} = \frac{\int_0^R \rho u_{(r,x)} 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u_{(r,x)} r dr \quad (2.28)$$

Então, conhecendo o perfil de velocidade ou a vazão mássica, pode-se determinar a velocidade média do fluido escoando. Este perfil é determinado resolvendo a equação de conservação de momento linear em um elemento diferencial e integrando no domínio inteiro do fluido com as condições de contorno estabelecidas. A partir destes são obtidas as Eqs. (2.29) e (2.30).

$$u_m = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2.29)$$

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.30)$$

Para determinar a queda de pressão, é conveniente trabalhar com o fator de atrito de Moody, dado pela Eq. (2.31)

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (2.31)$$

Após as operações correspondentes o fator de atrito f para um escoamento laminar plenamente desenvolvido, é dado pela Eq. (2.32).

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (2.32)$$

Para um escoamento turbulento, cuja análise é mais complexo, é preciso obter correlações baseadas em resultados experimentais. O fator de atrito f não é dependente unicamente do número de Reynolds, mas também das condições da superfície do tubo objeto de estudo. O valor de f parte de um mínimo (para tubos de superfícies lisas) e vai aumentando com o incremento da rugosidade da superfície. Para condições de parede lisa, o fator de atrito pode ser calculado mediante as correlações dadas nas Eqs. (2.33) e (2.34) com razoável precisão:

$$f = 0,316 Re_D^{-1/4}, \quad \text{para } Re_D \lesssim 2 \times 10^4 \quad (2.33)$$

$$f = 0,184 Re_D^{-1/5}, \quad \text{para } Re_D \gtrsim 2 \times 10^4 \quad (2.34)$$

Por outro lado, Pethukov (1970) desenvolveu uma única correlação para uma ampla faixa de números de Reynolds, como mostra a Eq. (2.35):

$$f = [0,790 \ln(Re_D) - 1,64]^{-2}, \quad \text{para } 3000 \lesssim Re_D \lesssim 5 \times 10^6 \quad (2.35)$$

Retomando a Eq. (2.31), e com o valor calculado do fator de atrito f , pode ser determinada a queda de pressão para um comprimento determinado. Integrando no comprimento total L do tubo, consegue-se a Eq. (2.36):

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (2.36)$$

Com este valor, é calculada a potência requerida para as condições fluidodinâmicas do escoamento com uso da Eq. (2.37):

$$\dot{W} = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho} \quad (2.37)$$

Quando o fluido é aquecido ou resfriado enquanto é forçado a escoar dentro de um tubo, sua temperatura varia desde T_p na superfície interior do tubo (parede), até um valor mínimo (se aquecermos o fluido) ou máximo (se resfriarmos o fluido). A temperatura média T_m é definida como a temperatura que permanece uniforme em uma seção transversal. Esta temperatura média é determinada através do uso do princípio de conservação da energia, mostrado na Eq. (2.38).

$$\dot{E}_{fluido} = \dot{m} C_p T_m = \int_{\dot{m}} C_p T \delta \dot{m} = \int_{A_c} \rho C_p T u dA_c \quad (2.38)$$

Onde C_p é o calor específico do fluido. O produto $\dot{m} C_p T_m$ em qualquer seção transversal ao longo da tubulação representa o fluxo de energia nessa seção.

Finalmente, para um fluido com massa específica e calor específico constantes escoando através de uma tubulação reta de seção circular com raio R , a temperatura média é dada pela Eq. (2.39).

$$T_m = \frac{2}{u_m R^2} \int_0^R \rho T_{(r,x)} V_{(r,x)} r dr \quad (2.39)$$

É importante notar que a temperatura média T_m do fluido varia durante um processo de aquecimento ou resfriamento. Nesse sentido, as propriedades do escoamento interno são avaliadas usualmente à temperatura média *volumétrica* do fluido, que é aproximada inicialmente como a média aritmética das temperaturas médias nas seções de entrada e saída do tubo.

2.6.2. Tipos de regimes de escoamento

Um escoamento interno pode ser definido como laminar, em transição ou turbulento segundo as condições as quais esteja submetido. O número adimensional usado para estabelecer qual é o regime do escoamento é o número de Reynolds, definido pela Eq. (2.40).

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{u_m D}{\nu} \quad (2.40)$$

Onde μ e ν , são a viscosidade dinâmica e cinemática, respectivamente.

Sob condições práticas e para as faixas estabelecidas a seguir, o regime do escoamento pode ser considerado:

Laminar	$Re_D < 2300$
Transicional	$2300 < Re_D < 10000$
Turbulento	$Re_D > 10000$

Em um escoamento em transição, o fluxo varia de laminar para turbulento aleatoriamente. É bom lembrar que o escoamento pode ser considerado laminar a altos valores de Reynolds (acima de 10000) em tubulações extremamente lisas, evitando sempre perturbações no escoamento e vibrações na tubulação (ver Incropera, 2008).

Outro número adimensional bastante utilizado para a caracterização do escoamento é o número de Prandtl, que relaciona as difusividades de momento e térmica, segundo a Eq. (2.41).

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.41)$$

Onde α é a difusividade térmica do fluido.

O número de Peclet relaciona as taxas de advecção e difusão de um determinado fenômeno físico. É calculado mediante a Eq. (2.42).

$$Pe_D = \frac{u D}{\alpha} = Re_D Pr \quad (2.42)$$

Em fenômenos de convecção, o número de Nusselt é importante porque relaciona a transferência de calor convectiva e a transferência de calor somente por condução, segundo a Eq. (2.43).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.43)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor convectiva, D é a grandeza característica (neste caso, o diâmetro).

Fazendo uma analogia, o número de Nusselt representa para a camada-limite térmica o que o coeficiente de atrito representa para a camada-limite hidrodinâmica. Além disso, o número de Nusselt pode ser definido em função dos outros números adimensionais como o Reynolds e o Prandtl, em relação a uma posição determinada da geometria do problema. Neste caso, o número de Nusselt local pode ser definido como uma função da seguinte forma: $Nu_x = f(x/L, Re_D, Pr)$. Desse modo, com o conhecimento do número de Nusselt é possível descrever o desenvolvimento do coeficiente de transferência de calor convectivo, h , para cada posição arbitrária x .

2.6.3. Região de entrada

Quando o fluido ingressar na tubulação circular a uma velocidade uniforme, as moléculas da camada em contato com a superfície interior do tubo serão completamente detidas. Do mesmo modo, o efeito do atrito entre camadas reduz gradualmente a velocidade das camadas adjacentes. O resultado é o desenvolvimento de uma camada limite de velocidades ao longo do tubo. A espessura desta camada limite se incrementa na direção do escoamento até chegar ao centro do tubo, como é mostrado na Fig. (2.9).

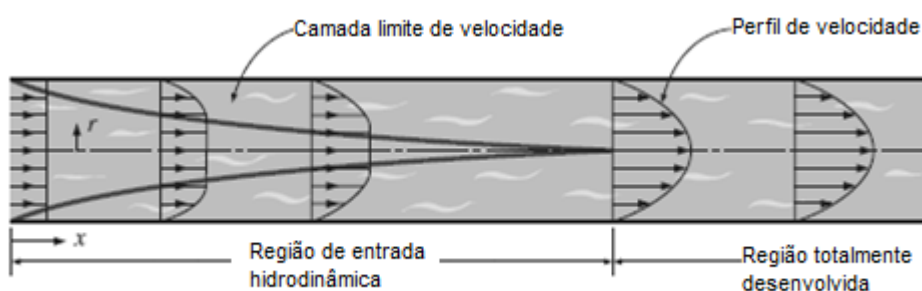


Figura 2.9 – Desenvolvimento do perfil de velocidade no interior do fluido. Fonte: Incropera, 2008.

A região desde a entrada da tubulação ao ponto de junção das camadas limites é denominada de entrada hidrodinâmica, com seu comprimento característico L_h . Nesta região, se considera que o escoamento está em desenvolvimento. Após essa distancia, o

perfil de velocidade em cada seção transversal permanece constante e o escoamento passa a se considerar totalmente desenvolvido.

No caso da temperatura, se na entrada for uniforme e a temperatura da superfície da tubulação se manter a uma temperatura diferente (maior ou menor), as moléculas do fluido estariam a esta mesma temperatura (por condução) variando também no sentido radial até o centro da tubulação (por convecção). Também neste caso, existe uma denominada região de entrada térmica de comprimento L_t , depois dela, pode-se considerar que o escoamento está totalmente desenvolvido. As Figs. (2.10) e (2.11) mostram a forma do perfil de temperatura para uma temperatura de parede menor e maior, respectivamente.

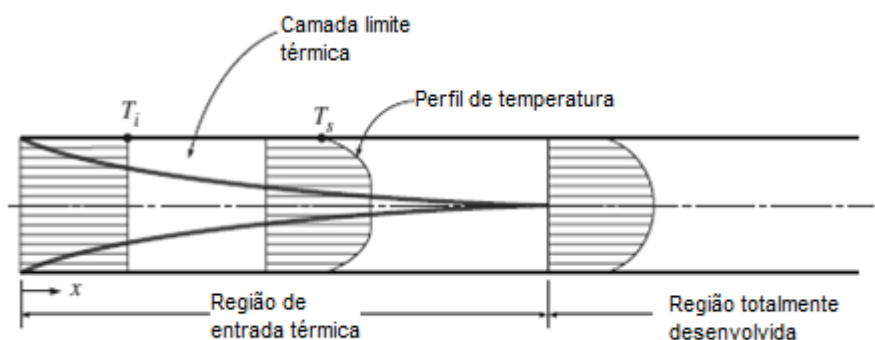


Figura 2.10 – Desenvolvimento do perfil de temperatura no interior do fluido (resfriamento).

Fonte: Çengel, 2009.

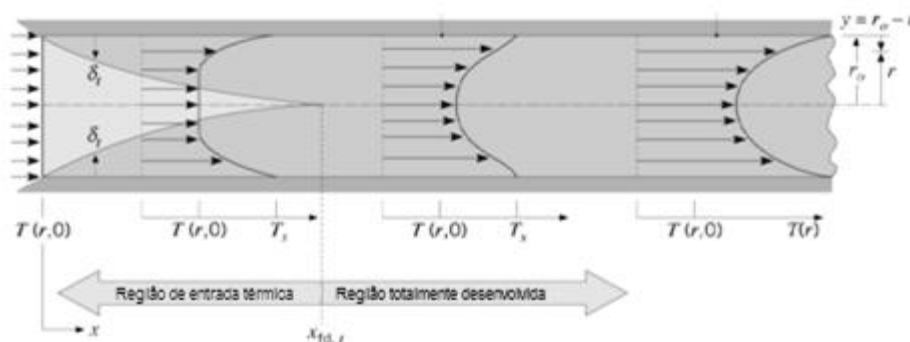


Figura 2.11 – Desenvolvimento do perfil de temperatura no interior do fluido (aquecimento).

Fonte: Incropera, 2008.

Para que o escoamento possa ser considerado totalmente desenvolvido, dever-se-ia desenvolver tanto hidrodinamicamente como termicamente. Para isso, deve satisfazer as condições dadas pelas Eqs. (2.44) e (2.45)

$$\frac{\partial u_{(r,x)}}{\partial x} = 0 \quad \rightarrow \quad u = u_{(r)} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_p(x) - T(r,x)}{T_p(x) - T_m(r,x)} \right] = 0 \quad (2.45)$$

Naquela parte do fluido, próxima à parede da tubulação, por estar em uma condição quase-estática, pode-se determinar a transferência de calor mediante a lei de Fourier para essa posição, usando a equação:

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.46)$$

Para o fluido nas camadas adjacentes, a transferência de calor é determinada pela definição do coeficiente de transferência de calor por convecção, segundo a correlação de resfriamento de Newton, como mostrada na Eq. (2.47).

$$q_s'' = h(T_p - T_m) \quad (2.47)$$

Onde T_p é a temperatura da parede e T_m é a temperatura média do fluido em uma posição axial de interesse. O sinal da diferença entre parênteses irá definir a direção do fluxo de calor: positivo para um processo de aquecimento ou negativo para resfriamento.

Combinando as Eqs. (2.46) e (2.47) obtemos uma correlação para a o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo, cuja expressão resulta na Eq. (2.48).

$$h = -k_f \frac{\partial T / \partial y|_{y=0}}{T_p - T_m} \quad (2.48)$$

2.6.4. Comprimentos de entrada

Em escoamento laminar, os comprimentos de entrada hidrodinamica e térmica podem ser calculados aproximadamente pelas correlações mostradas nas Eqs. (2.49) e (2.50).

$$L_{h,laminar} \approx 0,05 Re_D D \quad (2.49)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0,05 Re_D Pr D = Pr L_{h,laminar} \quad (2.50)$$

Para um escoamento turbulento, as flutuações aleatórias superam os efeitos de difusão de quantidade de movimento ou de calor. Portanto, os comprimentos de entrada

térmica e hidrodinâmica são praticamente iguais, independentemente do número de Prandtl. Uma correlação empregada para escoamento turbulento é a do Bhatti e Shah (1987), Eq. (2.51).

$$L_{h,turbulento} = 1,359 Re^{1/4} \quad (2.51)$$

A entrada hidrodinâmica é muito menor em regime turbulento e também a influencia do número de Reynolds. Na prática, é de uso geral considerar que os efeitos de entrada estão confinados em um comprimento aproximadamente igual a 10 vezes o diâmetro:

$$L_{h,turbulento} \approx L_{t,turbulento} \approx 10D \quad (2.52)$$

2.6.5. Análise térmica preliminar: Duas condições de contorno

Para fazer o balanço de energia definimos o volume de controle mostrado na Fig. (2.12)

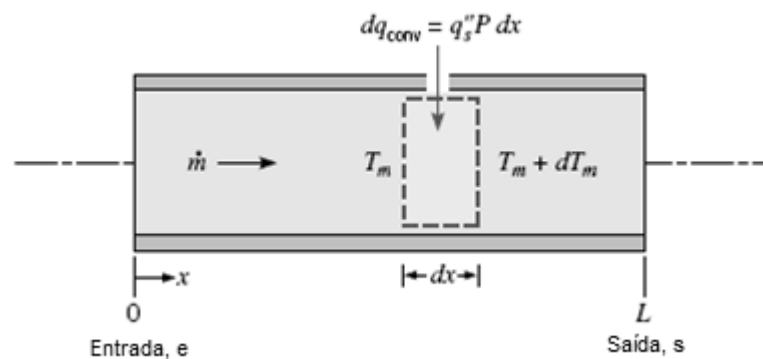


Figura 2.12 – Volume de controle para o balanço de energia. Fonte: Incropera, 2008

Aplicando o princípio da conservação de energia para um fluido em regime permanente dentro de um tubo se obtém a Eq. (2.53).

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (2.53)$$

Onde $T_{m,e}$ e $T_{m,s}$ são as temperaturas médias do fluido na entrada e na saída, respectivamente, e $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor para o fluido ou desde o fluido.

Lembrando a Eq (2.47), nota-se que a temperatura média do fluido varia durante o processo de aquecimento ou resfriamento. Mantendo o coeficiente de convecção de calor h

constante, a temperatura da parede do tubo deveria mudar se o fluxo de calor permanecer constante. De maneira inversa, o fluxo de calor variará se a temperatura da parede permanecer constante ao longo do tubo.

Com base em aplicações práticas, pode se aproximar as condições superficiais de transferência de energia em uma tubulação aos seguintes casos:

a. Fluxo de calor constante

Partindo de um balanço de energia no volume de controle, Eq.(2.54):

$$\dot{Q} = q_s'' A_s = \dot{m} C_p (T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (2.54)$$

Podemos determinar a temperatura média do fluido à saída de uma tubulação, usando a Eq (2.55):

$$T_{m,s} = T_{m,e} + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} C_p} \quad (2.55)$$

Mais especificamente, com o desenvolvimento da área de transferência de calor (parede lateral do tubo), é possível uma correlação para o cálculo da temperatura média do fluido em uma determinada posição x , conforme a Eq. (2.56).

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\dot{q}_s \pi D}{\dot{m} C_p} x \quad (2.56)$$

Segundo esta correlação, o valor da temperatura média é linearmente dependente da posição axial quando o fluxo de calor através da parede do tubo é constante.

A temperatura da parede pode ser calculada a partir de um arranjo da Eq. (2.47):

$$T_p = T_m + \frac{q_s''}{h} \quad (2.57)$$

Na região totalmente desenvolvida, a temperatura superficial T_p também aumenta linearmente sempre que o fluxo de calor e o coeficiente de calor convectivo permaneçam constantes. A tendência é facilmente observável na Fig. (2.13), que mostra que a inclinação das temperaturas média do fluido e da parede em relação com a posição axial no tubo, é constante enquanto sejam constantes o fluxo de calor superficial e o coeficiente convectivo de calor (isto é, em condições de escoamento plenamente desenvolvido).

A tendência é facilmente observável na Fig. (2.13), que mostra que a diferença das temperaturas média do fluido (T_m) e de parede (T_s) em qualquer posição axial no tubo é constante (isto é, em condições de escoamento plenamente desenvolvido).

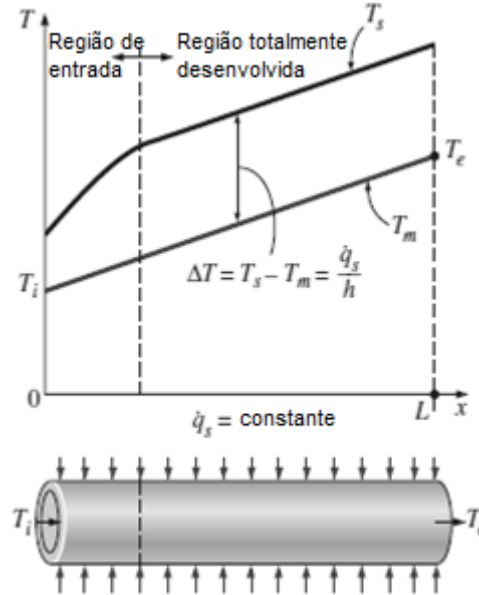


Figura 2.13 – Desenvolvimento das temperaturas de parede e média do fluido. Fonte: Incropera, 2008.

b. Temperatura de parede constante.

Partindo novamente da correlação de Newton, Eq. (2.47), a taxa de transferência de calor pode ser expressa pela Eq. (2.58).

$$\dot{Q} = hA_s(T_p - T_m)_{\text{média}} = hA_s\Delta T_{\text{média}} \quad (2.58)$$

O valor de h é o valor médio do coeficiente convectivo de transferência de calor; A_s é a área da superfície para a transferência de calor; e $\Delta T_{\text{média}}$ é uma média conveniente que representa a diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido.

Do balanço de energia em um volume de controle diferencial temos a Eq. (2.59)

$$\dot{m}C_p dT_m = h(T_p - T_m)dA_s \quad (2.59)$$

A área superficial do elemento diferencial é $dA_s = \pi D dx$, onde que T_p foi assumida como constante ao longo da tubulação. Tem-se que $dT_m = -d(T_p - T_m)$. Substituindo esta forma na Eq. (2.59), obtém-se a relação da Eq. (2.60):

$$\frac{d(T_p - T_m)}{T_p - T_m} = -\frac{h\pi D}{\dot{m}C_p} dx \quad (2.60)$$

Integrando ambos os lados da Eq. (2.60) entre $x = 0$ (onde $T_m = T_{m,e}$) e $x = L$ (onde $T_m = T_{m,s}$), resulta a Eq. (2.61).

$$\ln\left(\frac{T_p - T_{m,s}}{T_p - T_{m,e}}\right) = -\frac{h\pi DL}{\dot{m}C_p} \quad (2.61)$$

Isolando a temperatura média para uma posição x qualquer, obtemos a Eq. (2.62) para a determinação da temperatura média em uma seção qualquer do tubo circular.

$$T_{m,x} = T_p - (T_p - T_{m,e})e^{\left(\frac{h\pi Dx}{\dot{m}C_p}\right)} \quad (2.62)$$

Isolando o termo $\dot{m}C_p$, é obtida a Eq. (2.63):

$$\dot{m}C_p = -\frac{h\pi DL}{\ln[(T_p - T_{m,e})/(T_p - T_{m,s})]} \quad (2.63)$$

Substituindo esta forma na Eq. (2.54) e igualando à Eq. (2.58), é definida na Eq. (2.64) a média logarítmica das diferenças de temperatura.

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{m,e} - T_{m,s}}{\ln[(T_p - T_{m,s})/(T_p - T_{m,e})]} = \frac{\Delta T_{m,s} - \Delta T_{m,e}}{\ln(\Delta T_{m,s}/\Delta T_{m,e})} \quad (2.64)$$

A forma $\dot{Q} = hA_s\Delta T_{ml}$ é a mais adequada para a condição de contorno de temperatura de parede constante.

2.6.6. Correlações para convecção laminar e turbulenta em dutos

a. Regime Laminar

Levando em conta as considerações anteriores e segundo as duas condições de contorno adotadas, o problema físico de transferência de calor em uma tubulação reta horizontal pode ser resolvido analiticamente para a região plenamente desenvolvida do escoamento.

Para um escoamento laminar, a resolução das equações de conservação para a condição de fluxo constante de calor na parede, tem-se a Eq. (2.65).

$$T_m(x) - T_s(x) = \frac{11}{48} \frac{q_s'' D}{k} \quad (2.65)$$

Combinando a Eq. (2.65) com a correlação de Newton, Eq. (2.47), é obtido o conhecido valor do número de Nusselt para a região plenamente desenvolvida de um escoamento laminar com condição de fluxo de calor constante na parede, dada pela Eq. (2.66):

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4,36 \quad (2.66)$$

De modo semelhante, a resolução das equações de conservação para o escoamento laminar com temperatura de parede constante como condição de contorno dá como resultado outro valor constante para o número de Nusselt, Eq. (2.67).

$$Nu_D = 3,66 \quad (2.67)$$

Para a região de entrada, a resolução das equações de conservação é mais complexa, pois não podem ser desconsideradas tanto o termo de advecção radial, nem a velocidade e temperatura dependentes de x e r . Para determinar o desenvolvimento térmico do escoamento, é usual considerar que as condições térmicas começam a se desenvolver na presença de um perfil de velocidades totalmente desenvolvido. No caso do uso de fluidos de elevado número de Prandtl, como os óleos, não é necessária esta hipótese. Este enfoque, denominado *problema do comprimento de entrada térmica*, contrasta com a outra hipótese que assume que ambos os perfis térmico e hidrodinâmico se desenvolvem ao mesmo tempo (o que é chamado de *problema do comprimento de entrada combinada*).

A tendência das soluções de ambos os enfoques são mostrados na Fig. (2.14). O número de Nusselt local se desenvolve ao longo da tubulação: diminui desde um valor “infinito” para um valor constante, dependendo das condições de contorno estabelecidas.

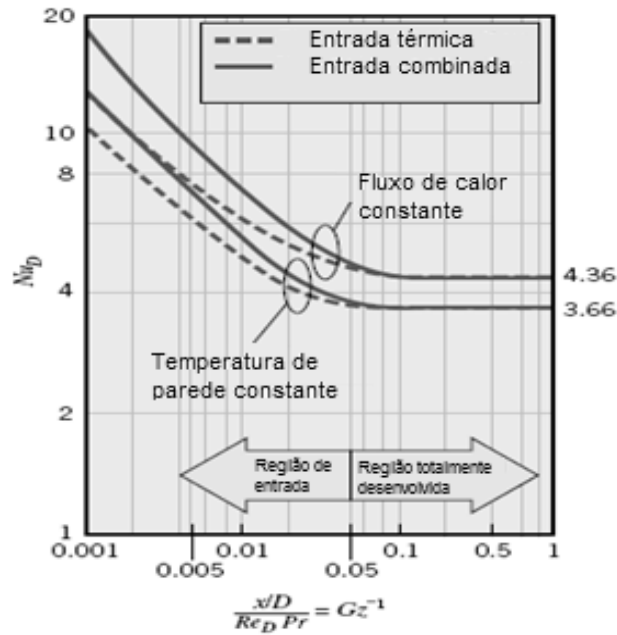


Figura 2.14 – Resultados obtidos em soluções de comprimento de entrada para um escoamento laminar em um tubo circular. Fonte: Incropera, 2008.

O número adimensional de Graetz, mostrado na Eq. (2.68), caracteriza o escoamento laminar em um conduto e é empregada (sua inversa) para uma melhor visualização dos comprimentos de entrada.

$$Gz_D = (D/x)Re_D Pr \quad (2.68)$$

Da Fig. (2.14), observa-se que a forma em que Nu_D varia com Gz_D^{-1} é independente do valor de Pr para o problema do comprimento de entrada térmica.

Se a condição de contorno for de temperatura de parede constante (seja o enfoque de comprimento de entrada térmica ou de entrada combinada para $Pr \gtrsim 5$), o valor no número de Nusselt médio é dado pela Eq. (2.69), proposta por Hausen:

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + 0,0668(D/L)Re_D Pr / \{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{\frac{2}{3}}\} \quad (2.69)$$

Para o comprimento de entrada combinada, Sieder e Tate (1936) propuseram a Eq. (2.70) com valores de Pr dentro da faixa estabelecida.

$$\overline{Nu}_D = 1,86(Re_D Pr D/L)^{1/3} (\mu/\mu_s)^{0,14} \quad \text{Para } 0,60 \lesssim Pr \lesssim 5 \text{ e } 0,0044 \lesssim \mu/\mu_s \lesssim 9,75 \quad (2.70)$$

b. Regime Turbulento

Sendo que a análise das condições em escoamentos turbulentos é muito mais complicada, as correlações para a descrição destes estão baseadas em resultados experimentais. Uma destas correlações clássicas para o cálculo do número de Nusselt local em escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos (hidrodinâmica e termicamente) através de tubos circulares lisos é a de Colburn (1933), Eq. (2.71).

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2.71)$$

A correlação de Dittus-Boelter (1930) é ligeiramente diferente e é a que possui maior preferência, sendo dada pela Eq. (2.72):

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (2.72)$$

Onde $n = 0,4$ para aquecimento (onde $T_p > T_m$) e $n = 0,3$ para resfriamento ($T_m > T_p$), na seguinte faixa de condições: $0,70 \leq Pr \leq 160$, $Re_D \geq 10000$ e $L/D \geq 10$. As equações podem ser usadas em diferenças de temperaturas pequenas a moderadas $T_p > T_m$, com todas as propriedades estimadas a T_m .

Em escoamentos com grandes variações de propriedades, é recomendável a utilização da Eq. (2.73), proposta por Sieder e Tate:

$$Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (2.73)$$

Para as condições: $0,70 \leq Pr \leq 16700$, $Re_D \geq 10000$ e $L/D \geq 10$, com todas as propriedades estimadas a T_m , a exceção de μ_s que é calculada à temperatura da parede.

O inconveniente da aplicação das equações anteriores está na grande incerteza admissível, quando comparados os resultados esperados, de até 25%. Correlações mais recentes têm demonstrado maior precisão no cálculo (com incertezas menores, próximas a 10%), como a de Gnielinski, Eq. (2.74).

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.74)$$

O fator de atrito pode ser obtido das correlações apresentadas anteriormente ou do diagrama de Moody. A correlação é válida para $0,50 \leq Pr \leq 2000$ e $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ (Incropera, 2008).

2.7. Transferência de calor por convecção de nanofluidos

2.7.1. Pesquisas experimentais

A maioria das pesquisas experimentais sobre a transferência de calor por convecção verifica que o uso de nanofluidos a intensifica em grande medida, embora não exista uma explicação contundente para esse fenômeno. Tal incremento ultrapassa os valores esperados inclusive com o uso das propriedades intensificadas dos nanofluidos (caso da condutividade térmica, viscosidade, etc.).

Para determinar o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção são construídas bancadas experimentais que permitam a aquisição de dados da temperatura e regime hidrodinâmico em uma determinada configuração física e sob condições de contorno estabelecidas. O problema da transferência de calor em escoamentos internos, apresentado na seção anterior, é um ponto de referência comum para muitas das pesquisas envolvidas com este tópico. Com o fim de comparar os resultados do cálculo de comportamento térmico e hidrodinâmico do escoamento de nanofluidos, e segundo a condição de contorno dada, a bancada experimental pode adotar o esquema da Fig. 2.15 para a condição de fluxo de calor constante; ou o esquema da Fig. 2.16, para a condição de temperatura de parede constante.

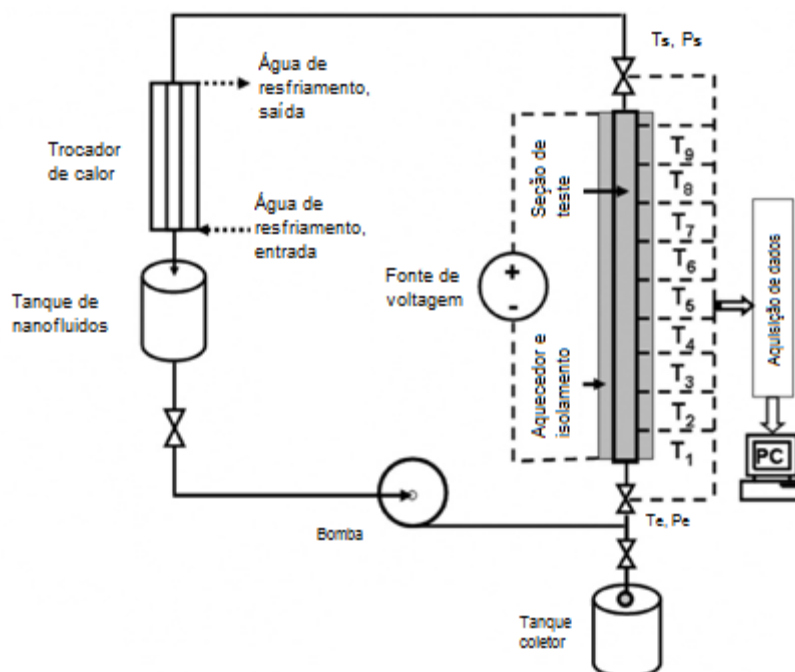


Figura 2.15 – Esquema de bancada operando com fluxo de calor constante. Fonte: Chen et al. (2008).

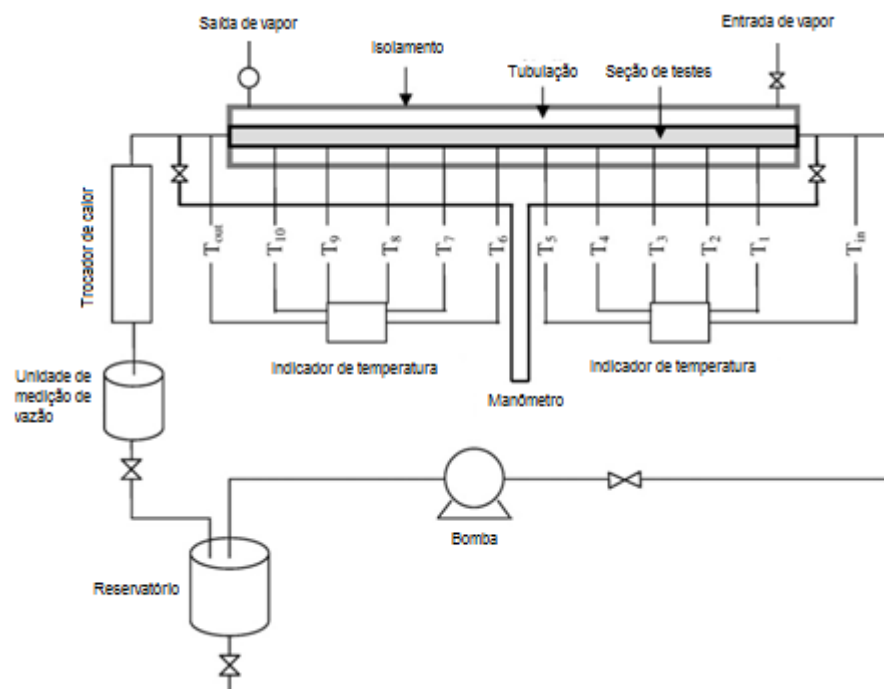


Figura 2.16 - Esquema de bancada operando com temperatura de parede constante. Fonte: Fotukian *et al.* (2010).

Xuan e Li (2000) mediram o valor do mesmo coeficiente para nanopartículas de cobre em água (de concentração volumétrica menor que 2%) escoando em regime turbulento (com números de Reynolds na faixa de 10000 a 25000), verificando também uma intensificação máxima de quase 40%.

Heris *et al.* (2009) também reportaram resultados para nanofluidos de alumina em água, com intensificações de 15% para a condutividade térmica e 40% para a transferência de calor por convecção.

Resultados de Rea *et al.* (2008) indicam que, em regime turbulento, a transferência de calor é intensificada em 27% para nanofluidos de alumina em água (com 6% de concentração volumétrica). Uma das conclusões do trabalho foi que, segundo a comparação dos dados experimentais com modelos teóricos, os nanofluidos podem ser considerados como misturas homogêneas, de modo que a intensificação da transferência de calor é devida apenas às propriedades melhoradas pela inclusão de nanopartículas no fluido base.

Entretanto, no caso de um escoamento de nanofluidos devem ser considerados outros fatores que intensificam a transferência de calor convectiva além dos valores esperados. Como foi observado anteriormente, tal intensificação dependerá não só da condutividade térmica efetiva do nanofluido e das condições do regime estudado, mas também das

características geométricas das nanopartículas e sua concentração. Segundo isto, Roetzel and Xuan (2000) propuseram a seguinte forma geral para o número de Nusselt:

$$Nu_{nf} = f \left[Re, Pr, \frac{k_{np} (\rho C_p)_{np}}{k_{fb} (\rho C_p)_{fb}}, \phi_{np}, forma da partícula \right] \quad (2.75)$$

Desde esta perspectiva, alguns autores já tinham dado propostas de correlações empíricas, como foi o caso de Pak e Cho (1998) com a determinação do número de Nusselt mediante a Eq. (2.76):

$$Nu_{nf} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,5} \quad (2.76)$$

A pesquisa de Xuan e Li (2000) veio com a proposta de correlações empíricas baseadas nos seus dados experimentais, os quais são mostrados na Eq. (2.77) e (2.78), para o cálculo do número de Nusselt em regime laminar e turbulento, respectivamente.

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} d}{k_{nf}} = 0,0059 (1,0 + 7,6286 \phi_{np}^{0,6886} Pe_{np}^{0,001}) Re_{nf}^{0,9238} Pr_{nf}^{0,4} \quad (2.77)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} d}{k_{nf}} = 0,4328 (1,0 + 11,285 \phi_{np}^{0,754} Pe_{np}^{0,218}) Re_{nf}^{0,333} Pr_{nf}^{0,4} \quad (2.78)$$

Em ambas as Eqs. (2.77) e (2.78), o Pe_{np} representa o número de Peclet para uma nanopartícula, que descreve o efeito da dispersão térmica causada pela micro-convecção e micro-difusão das nanopartículas suspensas.

2.7.2. Simulações numéricas

Embora os resultados das aproximações teóricas para as propriedades físicas dos nanofluidos sejam não concludentes, foram realizadas simulações numéricas que levam em conta os efeitos dinâmicos que modelos anteriores desconsideraram.

Um nanofluido é, pela natureza de sua produção, uma substância com múltiplos componentes. Daí que a maioria das pesquisas na literatura sobre convecção forçada considera o nanofluido como uma mistura bifásica homogênea, sem escorregamento entre as nanopartículas e o fluido base. Em convecção forçada o escoamento é caracterizado em função de ambos os números de Reynolds e Prandtl.

O estudo numérico deste tipo de escoamento em vários regimes é dividido em duas aproximações:

Primeira aproximação

A hipótese do nanofluido como um meio contínuo é ainda válida, ainda com as nanopartículas suspensas e considerando a condição de não-escorregamento entre ambos os componentes do nanofluido. Isto significa que o escoamento pode ser considerado como monofásico, apenas com as propriedades físicas modificadas.

Segunda aproximação

Considera o nanofluido como um composto bifásico para uma melhor descrição do comportamento das fases líquida e sólida. Esta é uma maneira mais aproximada para o estudo do fenômeno, já que assume uma velocidade de escorregamento diferente de zero devido a diversos fatores como a gravidade, atrito entre as moléculas do fluido base e as nanopartículas, difusão Browniana, sedimentação, dispersão, entre outras. Esta aproximação aplica um enfoque dinâmico para cada fase, euleriano para o fluido base e lagrangiano para as nanopartículas (para dessa forma capturar suas trajetórias individuais). Neste trabalho, será adotada a primeira aproximação, que considera um escoamento monofásico de nanofluidos com propriedades térmicas e reológicas modificadas.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

O presente capítulo inicia com uma análise preliminar dos modelos convencionais para a determinação das propriedades dos nanofluidos. Isto, com o objetivo de estabelecer algum critério para a seleção dos nanofluidos a serem simulados e obter maior diversidade de resultados. Com os nanofluidos e modelos selecionados, são calculadas as propriedades modificadas necessárias para a simulação numérica.

Em seguida, são apresentadas algumas definições básicas da fluidodinâmica computacional, e também um breve resumo das características mais relevantes dos programas utilizados para a simulação numérica.

Finalmente, e com base nas características mencionadas, são definidas a configuração geométrica e física do problema para a obtenção da solução numérica.

3.2. Cálculo das propriedades de nanofluidos

Assim como para a determinação experimental do comportamento térmico do uso de nanofluidos, o primeiro passo antes de simular um escoamento de nanofluidos é a obtenção do nanofluido. A Fig. 3.1 mostra, esquematicamente, que o objetivo da preparação dos nanofluidos é obter os valores das propriedades intensificadas pelo efeito da inclusão de nanopartículas no fluido base.

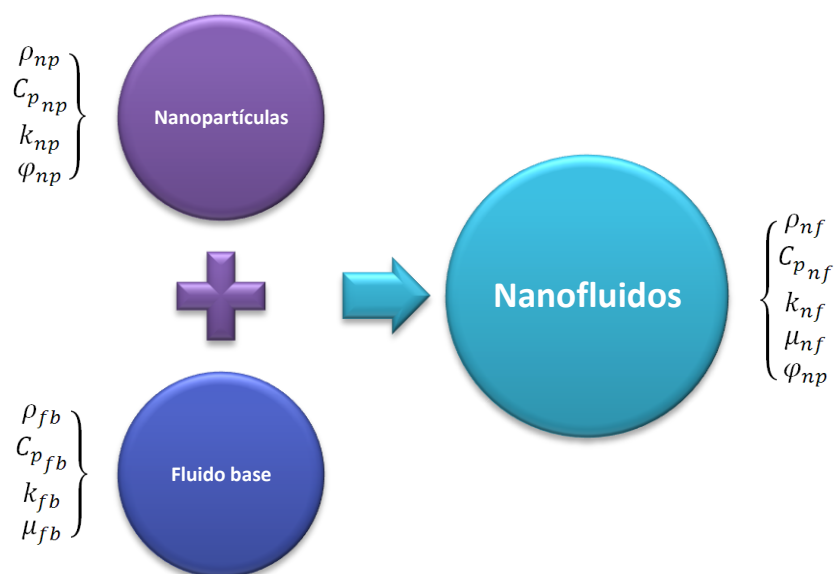


Figura 3.1 - Representação esquemática da “preparação” de nanofluidos.

Apesar de ser a síntese de nanofluidos uma das principais barreiras para sua aplicação, mesmo em termos de experimentação, é grande a variedade de misturas encontradas na literatura. Uma das dificuldades encontradas na revisão bibliográfica foi a caracterização parcial e, em alguns casos, deficiente dos fluidos base e das nanopartículas. Desse modo, com a informação incompleta dos nanofluidos foi muito difícil reproduzir os cálculos realizados mediante as correlações determinadas para as propriedades. Inclusive, não existe uma fonte que forneça todos os valores corretos para as propriedades dos componentes do nanofluido.

É importante destacar que na literatura aberta, as propriedades dos componentes do nanofluidos referenciam as propriedades dos materiais à escala macro. As propriedades dos nanofluidos no presente trabalho serão calculadas a partir dos dados mostrados na Tab. 3.1, cujas principais fontes foram: o banco de artigos coletados pelo grupo de nanofluidos do LEST-UFU, o banco de dados do programa EES® e dados coletados da internet, nessa ordem de relevância.

Tabela 3.1 – Propriedades de fluidos base e nanopartículas usadas.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS				
Fluidos Base				
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	μ (Pa-s)
<i>Água</i>	997,10	4183,10	0,5948	$8,91 \times 10^{-4}$
<i>Etileno glicol</i>	1112,10	2408,60	0,2530	$1,72 \times 10^{-2}$
<i>PAO⁽¹⁾</i>	789,80	2208,99	0,1561	$3,02 \times 10^{-2}$

Nanopartículas				
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	
Prata	10490	235	429,14	
Cobre	8920	390	401,80	
Ferro	7874	440	79,84	
Alumina (Al ₂ O ₃)	3860	850	40,00	
Óxido cúprico (CuO)	6310	532	76,00	
Óxido de Titânio (TiO ₂)	4260	689	11,70	
Sílica (SiO ₂)	2200	720	1,50	

(1) Poli-alfa-oleofin.

Como observado na Seção 2.4, a determinação de propriedades como a condutividade térmica e a viscosidade ainda geram muita controvérsia em ambas as áreas de pesquisa: teórica e experimental. Por outro lado, o cálculo da massa específica e do calor específico, são tópicos menos controversos. Nesse sentido, notou-se que, a partir da seleção de um modelo teórico para o cálculo das propriedades, também pode ser estabelecido um critério para a escolha de nanofluidos a serem utilizados. Sendo que os modelos teóricos mais convencionais (isto é, Maxwell para condutividade, Einstein para viscosidade) não levam em consideração outros fatores além dos valores das propriedades estudadas para cada componente e a concentração volumétrica das nanopartículas, foi considerado que a razão entre as propriedades da nanopartícula e do fluido base é um parâmetro importante para descrever as intensificações de maneira mais geral.

Assim, nota-se que k_r é a razão entre as condutividades térmicas da nanopartícula e o fluido base, como mostrado na Eq. (3.1):

$$k_r = \frac{k_{np}}{k_{fb}} \quad (3.1)$$

Isolando este termo da Eq. (2.6), é obtida a Eq. (3.2), que representa a intensificação calculada pelo modelo de Maxwell em função do parâmetro k_r e a concentração volumétrica ϕ_{np} , como segue:

$$k_{int-Max} = \frac{2+k_r+2\phi_{np}(k_r-1)}{2+k_r-\phi_{np}(k_r-1)} \quad (3.2)$$

A Fig. 3.2. mostra a tendência da intensificação da condutividade térmica, k_{int} , em relação com a razão de condutividades de ambas as fases líquida e sólida do nanofluido, k_r , para distintos valores de concentração volumétrica de nanopartículas.

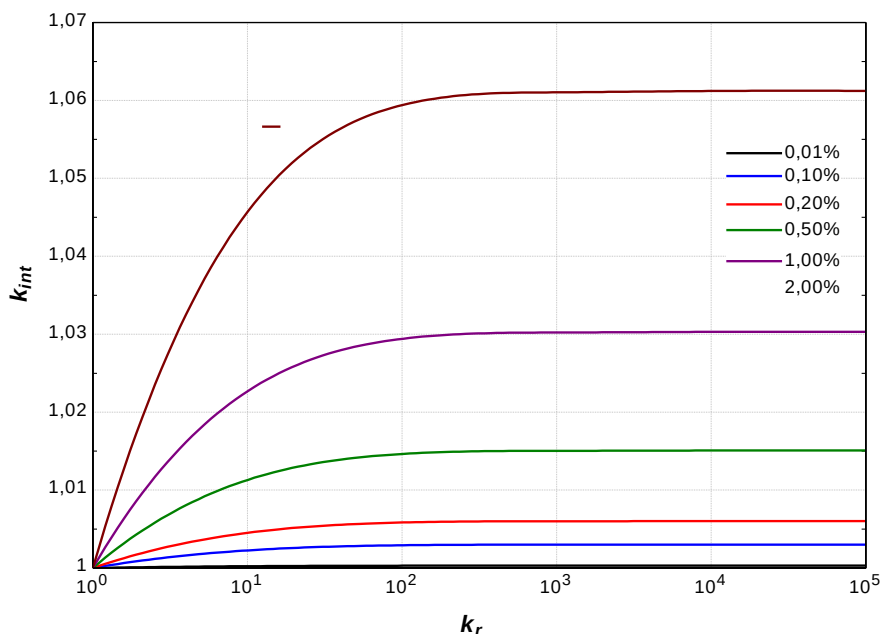


Figura 3.2. Intensificação da condutividade térmica de nanofluidos para distintas razões de condutividade nanopartícula / fluido base.

É importante destacar que a escala do gráfico é logarítmica para k_r . A faixa pode parecer exagerada, pois valores de condutividade térmica acima de dez mil são irreais. No entanto, o exagero na faixa mostrada contribui para a visualização da tendência. É interessante observar que, para aqueles nanofluidos com nanopartículas de altíssima condutividade em fluidos base de baixíssima condutividade (isto é, para altos valores de k_r), os valores de intensificação da condutividade térmica atingem um valor máximo a partir de um valor crítico. No caso mostrado na Fig. 3.2 (segundo o modelo de Maxwell), para misturas de condutividade relativa k_r na faixa de 100 a 1000, observa-se que esta o incremento desta razão não tem uma influência significativa para a intensificação, especialmente em baixas concentrações. Para valores de condutividade relativa superiores a 1000, a intensificação atinge um valor máximo, que é independente do parâmetro k_r para todas as concentrações mostradas.

Para o caso da viscosidade a análise é praticamente direta, pois isolando o termo de viscosidade relativa das correlações convencionais apresentadas na seção 2.4.3, são obtidas funções dependentes apenas da concentração volumétrica com as tendências mostradas na Fig. 3.3.

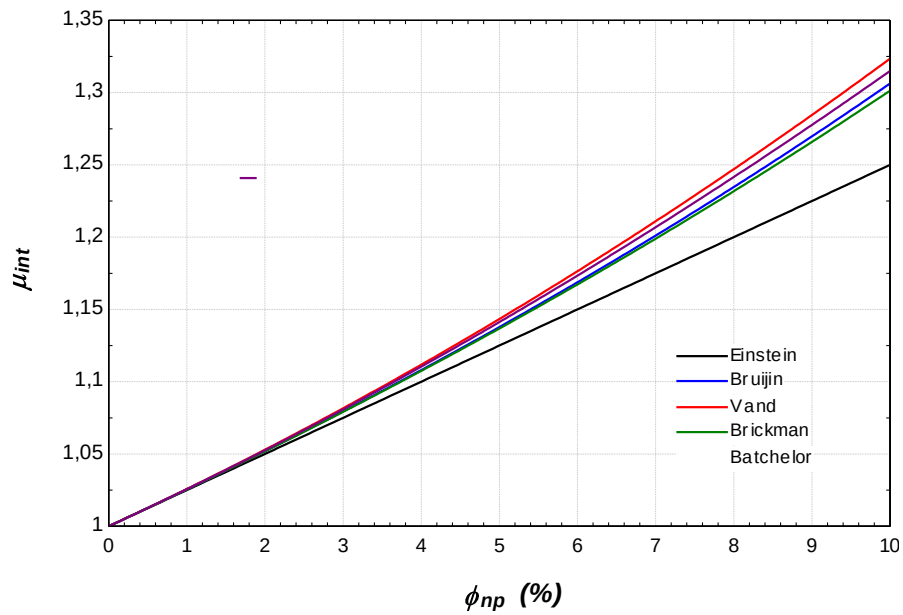


Figura 3.3 – Comparação dos modelos de viscosidade em função da concentração volumétrica.

Para o caso das demais propriedades, como a massa específica e o calor específico, foram definidas às seguintes propriedades relativas:

$$\rho_r = \frac{\rho_{np}}{\rho_{fb}} \quad (3.3)$$

$$(C_p)_r = \frac{(C_p)_{np}}{(C_p)_{fb}} \quad (3.4)$$

Escrevendo os termos ρ_{int} e $(C_p)_{int}$ em função das propriedades relativas, obteve-se como resultado as Eqs. (3.5) e (3.6).

$$\rho_{int} = (1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r \quad (3.5)$$

$$(C_p)_{int} = \frac{(1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r(C_p)_r}{(1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r} \quad (3.6)$$

Analisando a correlação dada pela Eq. (3.5), para as mesmas concentrações utilizadas no caso da condutividade térmica, é obtida a Fig. 3.4 para as intensificações da massa específica que verifica a tendência esperada: linear e crescente com a concentração volumétrica de nanopartículas.

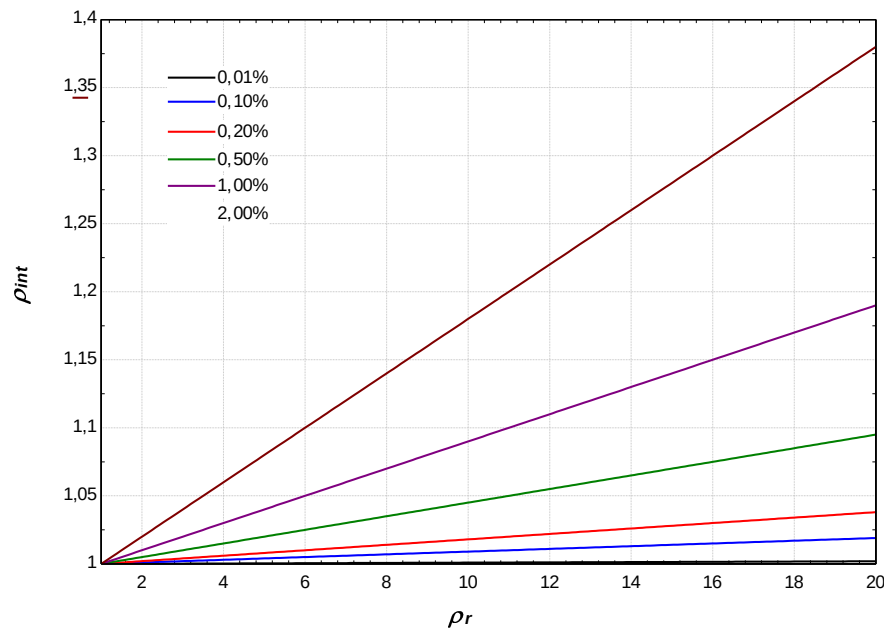


Figura 3.4 – Tendência da intensificação da massa específica em nanofluidos variando com a concentração volumétrica.

Para o caso da intensificação do calor específico, é preciso estabelecer previamente o valor da massa específica relativa. Por tal motivo, foram calculados os valores de variação do calor específico, $(C_p)_{int}$, com uso da Eq. (3.6), primeiro para $\rho_r = 2$, e depois para $\rho_r = 5$, mostrados nas Figs. 3.5 e 3.6, respectivamente, a fim de se observar melhor o comportamento.

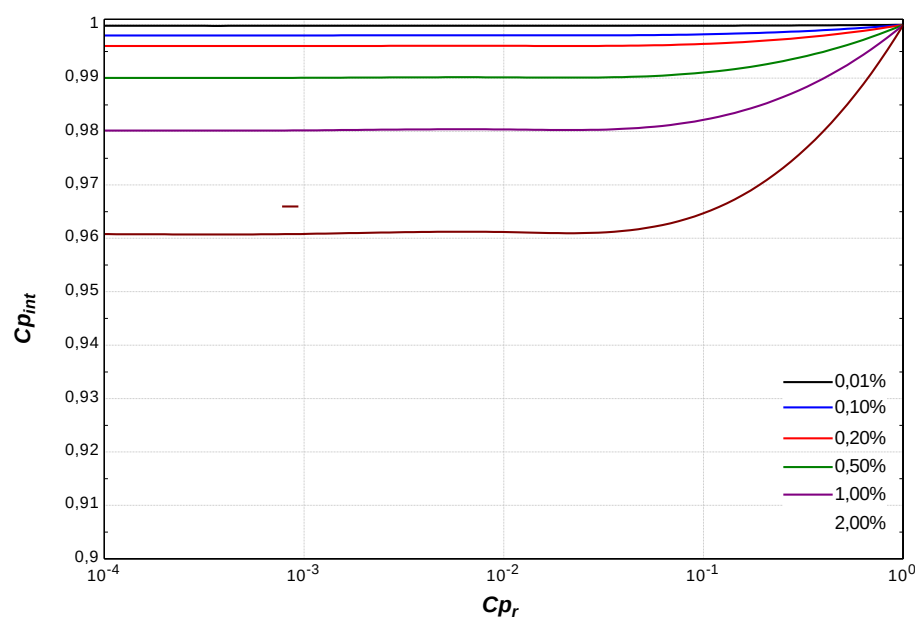


Figura 3.5 - Tendência da variação do calor específico em nanofluidos com $\rho_r = 2$, variando com a concentração volumétrica.

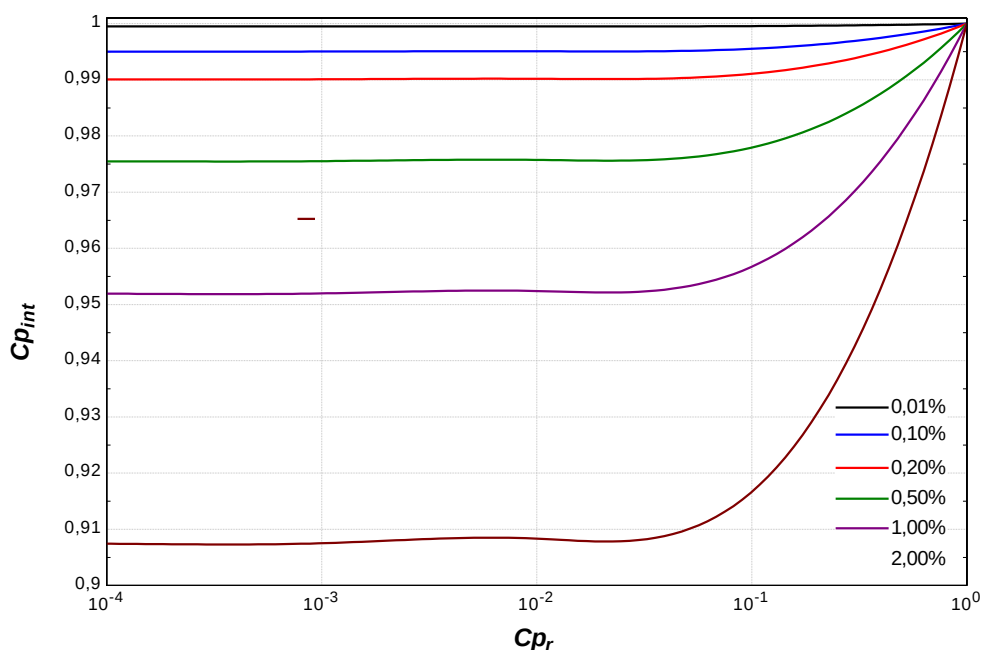


Figura 3.6 - Tendência da variação do calor específico em nanofluidos com $\rho_r = 5$, variando com a concentração volumétrica.

É interessante observar que um maior valor da massa específica relativa da nanopartícula em relação ao fluido base, influencia negativamente o calor específico do nanofluido (conforme observado na Tab. 3.1, os valores desta propriedade nos fluidos base são muitas vezes maiores que aqueles das nanopartículas). Também neste caso obteve-se uma tendência similar à da condutividade térmica, isto é, com um efeito de *saturação* na variação da propriedade a partir de um valor de calor específico relativo.

Até este ponto, cada propriedade foi calculada com base nas correlações convencionais mencionadas anteriormente. No entanto, para determinar a aplicabilidade de cada modelo teórico e escolher os materiais a serem utilizados para a preparação dos nanofluidos, é necessário determinar uma faixa de propriedades relativas coerente com a realidade. Nesse sentido, e a partir das propriedades mostradas na Tab. 3.1, foram calculadas as propriedades relativas para cada binômio nanopartícula e fluido base (água, etileno glicol, óleo poli-alfa-oleofin). Os resultados destes cálculos são apresentados nas Tabs. 3.2, 3.3 e 3.4, para a massa específica, calor específico e condutividade térmica, respectivamente.

Tabela 3.2 – Massa específica relativa para os dados da Tab. 3.1.

RAZÃO DAS MASSAS ESPECÍFICAS			
	<i>Água</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofin</i>
Ag	10,52	9,43	13,28
Cu	8,95	8,02	11,29
Fe	7,90	7,08	9,97
CuO	6,33	5,67	7,99
Al₂O₃	3,87	3,47	4,89
TiO₂	4,27	3,83	5,39
SiO₂	2,21	1,98	2,79

Tabela 3.3 – Calores específicos relativos dos dados da Tab. 3.1.

RAZÃO DOS CALORES ESPECÍFICOS			
	<i>Água</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofin</i>
Ag	0,06	0,10	0,11
Cu	0,09	0,16	0,18
Fe	0,11	0,18	0,20
CuO	0,13	0,22	0,24
Al₂O₃	0,20	0,35	0,38
TiO₂	0,16	0,29	0,31
SiO₂	0,17	0,30	0,33

Tabela 3.4 – Condutividades térmicas relativas dos dados da Tab. 3.1.

RAZÃO DAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS			
	<i>Água</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofin</i>
Ag	721,49	1696,21	2749,14
Cu	675,52	1588,14	2573,99
Fe	134,23	315,57	511,47
CuO	127,77	300,40	486,87
Al₂O₃	67,25	158,10	256,25
TiO₂	19,67	46,25	74,95
SiO₂	2,52	5,93	9,61

Estes valores relativos foram de utilidade no momento de estabelecer quais nanofluidos teriam os efeitos mais significativos de intensificação ou modificação das

propriedades necessárias para simular o escoamento. Uma forma mais direta de visualizar estas relações é apresentada nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

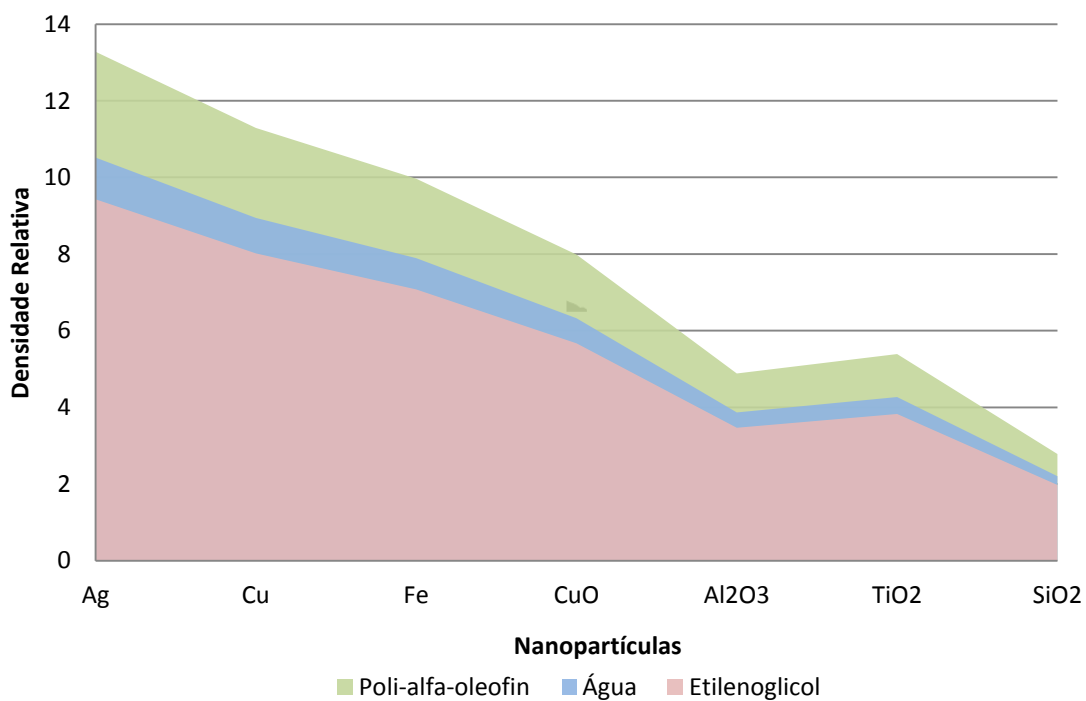


Figura 3.7 – Massas específicas relativas para os dados da Tab. 3.1.

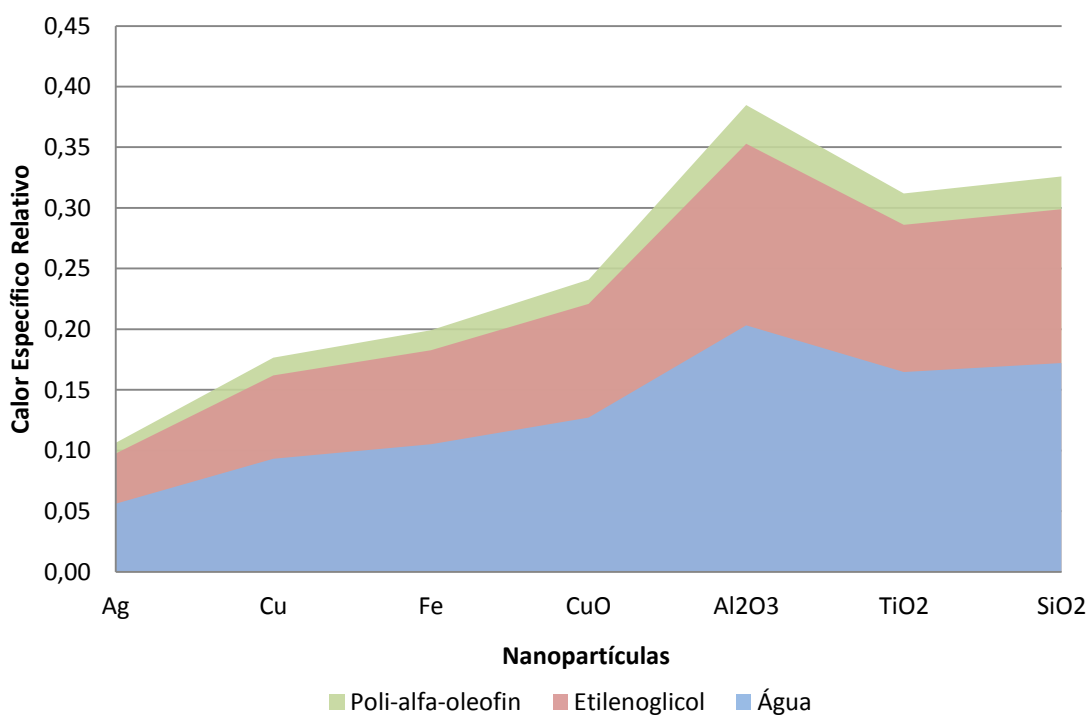


Figura 3.8 – Calores específicos relativos para os dados da Tab. 3.1.

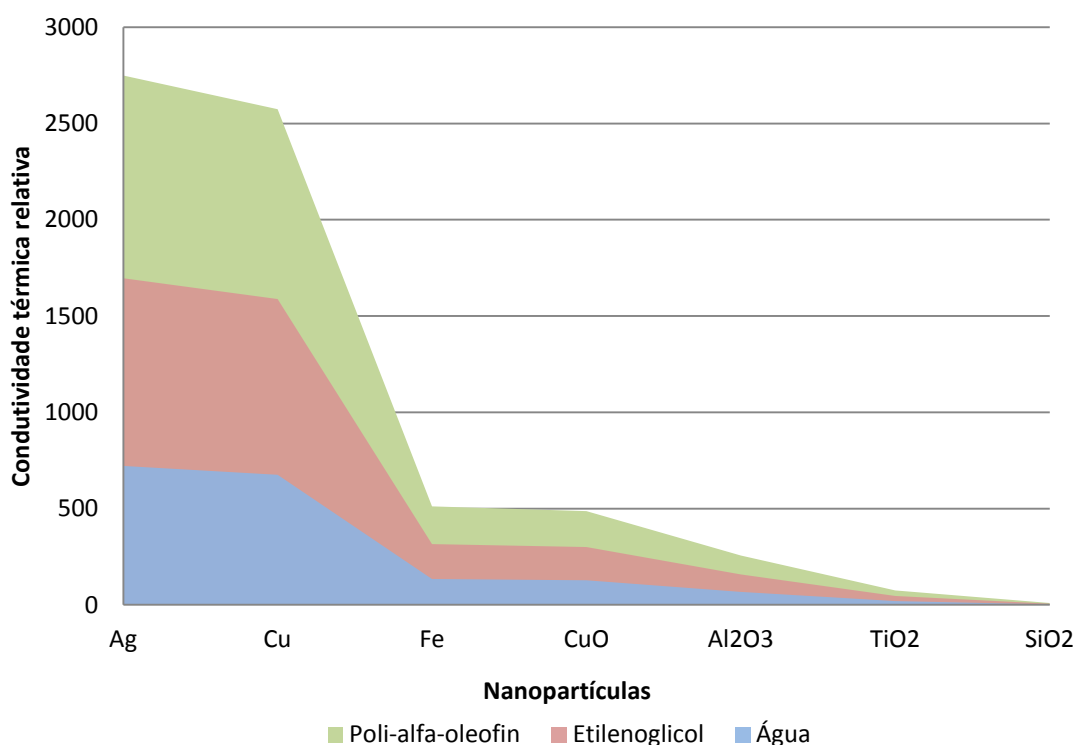


Figura 3.9 – Condutividades térmicas relativas para os dados da Tab. 3.1.

Da Fig. 3.9 se consegue visualizar melhor a previsão de quais combinações de nanopartículas e fluidos base apresentarão uma maior intensificação da condutividade térmica, em concordância com os objetivos do presente trabalho, que é determinar o comportamento térmico e hidrodinâmico de um escoamento de nanofluido com propriedades modificadas.

Como mencionado anteriormente, e com base nas correlações convencionais que foram empregadas, observou-se que a preparação de nanofluidos com componentes cuja relação de condutividades térmicas for superior a 1000, na faixa de 1% a 5% de concentração volumétrica, a intensificação da condutividade térmica é a mesma (conforme o mostrado na Fig. 3.2). Desse modo, e retomando os valores da Tab. 3.4, pode-se descartar alguns dos materiais inicialmente propostos para a preparação dos nanofluidos, tomando como referência uma faixa de valores de k_r entre 100 e 1000. Os valores retirados foram marcados com vermelho na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Combinações de nanofluidos restringidas.

RAZÃO DAS CONDUTIVIDADES TÉRMICAS			
	<i>Água</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>PAO</i>
Ag	721,49	1696,21	2749,14
Cu	675,52	1588,14	2573,99
Fe	134,23	315,57	511,47
CuO	127,77	300,40	486,87
Al₂O₃	67,25	158,10	256,25
TiO₂	19,67	46,25	74,95
SiO₂	2,52	5,93	9,61

Observa-se na Tab. 3.5, que os nanofluidos que contêm nanopartículas de sílica (SiO₂) e titânia (TiO₂) não conseguirão uma intensificação significativa, ainda para concentrações elevadas (conforme observado na Fig. 3.2), e foram removidos por esse motivo.

Com isto conseguiu-se restringir a quantidade de simulações a serem realizadas aos nanofluidos mostrados na Tab. 3.6, que serão identificados mediante uma sequência alfanumérica para facilitar as referências. Também foi necessário definir a faixa de concentrações dos nanofluidos que serão simulados. Uma faixa razoável e coerente com muitas pesquisas teóricas e experimentais, que será adotada no presente trabalho, é a seguinte: 1%, 2% e 5%.

Tabela 3.6 – Identificadores dos nanofluidos a serem utilizados.

NANOFLUIDOS			
	<i>Água (F1)</i>	<i>Etileno Glicol (F2)</i>	<i>PAO (F3)</i>
Ag	F1N1		
Cu	F1N2		
Fe	F1N3	F2N3	F3N3
Al₂O₃	F1N4	F2N4	F3N4
CuO	F1N5	F2N5	F3N5

Assim, o identificador do nanofluido vem dado pela sequência: F#N#C#, onde o primeiro número faz referência ao fluido base utilizado, sendo (1) para a água, (2) para o etileno glicol e (3) para o óleo poli-alfa-oleofin; o segundo dígito, à nanopartícula: (1) para a

prata, (2) para o cobre, (3) para o ferro, (4) para alumina e (5) para o óxido de cobre; e o último dígito, se for necessário, à concentração volumétrica, sendo (1) para 1%, (2) para 2% e (3) para 5%. Somente no caso das nanopartículas de alumina dispersas em água será feita uma exceção, considerando as múltiplas pesquisas teóricas e experimentais encontradas que poderão servir para posteriores comparações em futuros trabalhos.

Neste ponto, é importante definir quais correlações serão empregadas no cálculo das propriedades modificadas dos nanofluidos. Para esse fim, é considerado que o caso menos favorável para a transferência de calor ocorre à menor intensificação da condutividade térmica. Por outro lado, é claro que uma grande intensificação da viscosidade reduz a aplicabilidade do nanofluido devido ao correspondente incremento da potência de bombeamento. Por tal motivo, foram selecionados o modelo de Maxwell e o de Batchelor para o cálculo das intensificações da condutividade térmica e viscosidade, respectivamente. A massa específica e o calor específico dos nanofluidos serão calculados utilizando as correlações únicas, dadas pelas Eqs. (2.25) e (2.26), respectivamente.

Desse modo, com base nos nomes das combinações propostas na Tab. 3.6, podem ser calculadas as propriedades dos nanofluidos a serem utilizados na simulação numérica. Os resultados são apresentados na Tab. 3.7.

Tabela 3.7 – Propriedades dos nanofluidos a serem usados nas simulações.

BANCO DE DADOS DOS NANOFLUIDOS						
<i>Fluido Base</i>	<i>Nanopartícula</i>	$\phi_{np}(\%)$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kg-K)}$	$k \text{ (W/m-K)}$	$\mu \text{ (Pa-s)}$
F1 (ADI ¹)	N1 (Prata)	1%	1092,03	3803,85	0,6127	9,13E-04
		2%	1186,96	3485,26	0,6311	9,35E-04
		5%	1471,75	2776,08	0,6883	1,00E-03
	N2 (Cobre)	1%	1076,33	3868,75	0,6127	9,13E-04
		2%	1155,56	3597,50	0,6311	9,35E-04
		5%	1393,25	2968,87	0,6883	1,00E-03
	N3 (Ferro)	1%	1065,87	3906,58	0,6124	9,13E-04
		2%	1134,64	3663,58	0,6304	9,35E-04
		5%	1340,95	3084,13	0,6865	1,00E-03
	N4 (Alumina)	1%	1025,73	4057,67	0,6120	9,13E-04
		2%	1054,36	3939,05	0,6296	9,35E-04
		5%	1140,25	3618,93	0,6844	1,00E-03
	N5 (Óxido de cobre)	1%	1050,23	3963,73	0,6124	9,13E-04
		2%	1103,36	3765,49	0,6304	9,35E-04

		5%	1262,75	3270,86	0,6864	1,00E-03
F2 (EG ²)	N3 (Ferro)	1%	1179,72	2277,21	0,2606	1,76E-02
		2%	1247,34	2160,06	0,2683	1,81E-02
		5%	1450,20	1874,16	0,2926	1,93E-02
	N4 (Alumina)	1%	1139,58	2355,81	0,2605	1,76E-02
		2%	1167,06	2305,50	0,2682	1,81E-02
		5%	1249,50	2167,85	0,2922	1,93E-02
	N5 (Óxido de cobre)	1%	1164,08	2306,88	0,2606	1,76E-02
		2%	1216,06	2213,85	0,2683	1,81E-02
		5%	1372,00	1977,06	0,2925	1,93E-02
F3 (PAO ³)	N3 (Ferro)	1%	860,64	2047,15	0,1608	3,09E-02
		2%	931,48	1909,92	0,1656	3,17E-02
		5%	1144,01	1600,21	0,1806	3,40E-02
	N4 (Alumina)	1%	820,50	2145,06	0,1608	3,09E-02
		2%	851,20	2085,74	0,1655	3,17E-02
		5%	943,31	1930,94	0,1804	3,40E-02
	N5 (Óxido de cobre)	1%	845,00	2083,76	0,1608	3,09E-02
		2%	900,20	1973,89	0,1656	3,17E-02
		5%	1065,81	1712,57	0,1806	3,40E-02

¹ ADI: água deionizada; ² EG: etileno glicol; ³ PAO: poli-alfa-oleofin.

3.3. Alcances sobre simulação numérica

A fluidodinâmica computacional (CFD por sua sigla em inglês) é a parte da ciência que estima o escoamento de um fluido, a transferência de calor e massa, as reações químicas envolvidas e outros fenômenos relacionados mediante a solução numérica das equações que os governam, geralmente quando a solução analítica não é possível.

Para a estimativa do comportamento térmico e hidrodinâmico, as equações governantes empregadas são:

- Conservação de massa

$$\frac{\partial \rho_{nf}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V}_{nf}) = 0 \quad (3.7)$$

- Conservação da quantidade de movimento linear

$$\frac{\partial \rho_{nf} \mathbf{V}_{nf}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V}_{nf} \mathbf{V}_{nf}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}_{nf} - \mathbf{S}_p + \rho_{nf} \mathbf{g} \quad (3.8)$$

- Conservação de energia

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}_{nf} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot [k \nabla T] \quad (3.9)$$

Denomina-se *solver* ao programa que soluciona numericamente as equações de conservação anteriormente mostradas. Os *solvers* utilizados pelos pacotes de fluidodinâmica computacional incluídos no ANSYS® (CFX® e FLUENT®) estão baseados no método dos volumes finitos. Isto é, dividir a região do fluido em um número finito de volumes de controle, sobre as quais são resolvidas as equações de conservação (de massa, de momento linear, energia, espécies, etc.). Estas equações diferenciais parciais, Eqs. (3.7), (3.8) e (3.9), são discretizadas em um sistema de equações lineares, que podem ser resolvidas utilizando métodos numéricos.

Comumente, os resultados obtidos da análise usando CFD são relevantes em: estudos conceituais, desenvolvimento detalhado de um novo produto, estudos de casos e no redesenho dos mesmos. É também usado como complemento da experimentação, pois contribui para reduzir os custos requeridos na construção de bancadas experimentais e também fornecer estimativas para a variação de diversos parâmetros.

A solução de um problema via simulação numérica implica um processo que segue determinados passos, mostrados na Fig. 3.10 e descritos brevemente a seguir.

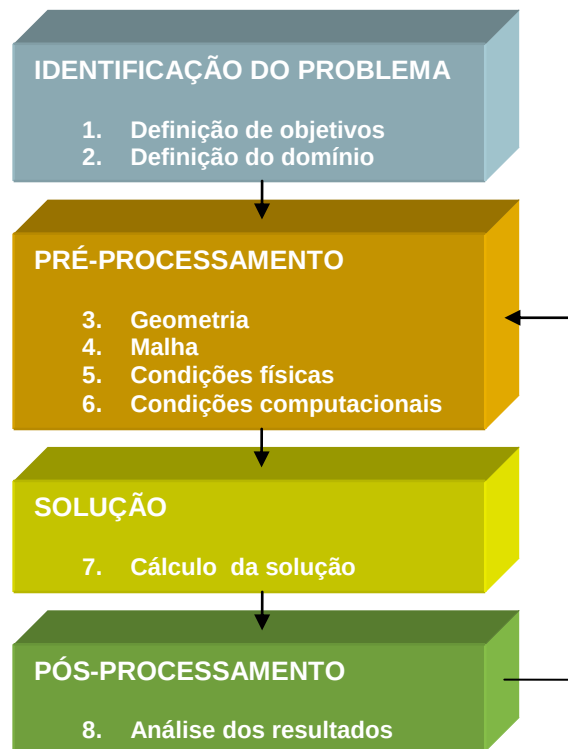


Figura 3.10 – Esquema do processo de solução numérica de um problema.

1. Definição de objetivos

Neste ponto, é necessário determinar quais são os parâmetros que se deseja medir (por exemplo: perda de carga, vazão mássica, campo de temperaturas, etc.). São comuns as questões iniciais como:

- Quais modelos físicos serão necessários incluir na análise (turbulência, compressibilidade, radiação, etc.)?
- Quais serão as hipóteses para a simplificação do modelo estudado?
- Serão necessárias condições específicas de modelagem para o problema?
- Qual é o grau de precisão requerido?
- Qual é o tempo disponível para a obtenção dos resultados?

2. Definição do domínio

O objetivo principal da determinação do domínio é o isolamento da parte do sistema que se pretende analisar. Esta determinação inclui a definição dos limites físicos e dos tipos de condições de contorno segundo as informações disponíveis (e se estas precisam ser adaptadas), como mostrado na Fig. 3.11. Às vezes, é necessário modificar o domínio até um ponto no qual os dados do problema possam ser de utilidade. Muitas vezes, também,

um problema tridimensional pode ser simplificado a um problema bidimensional ou axissimétrico.

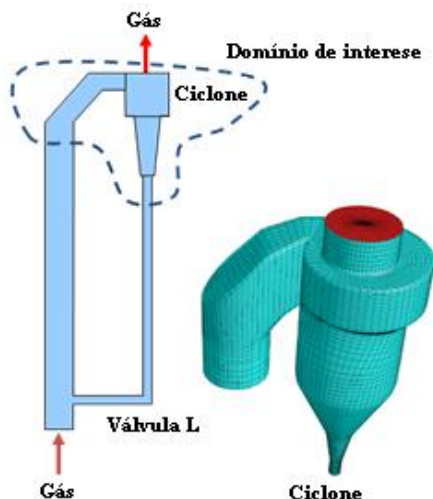


Figura. 3.11. Exemplo do isolamento de um elemento objeto de estudo.

3. Geometria

A geometria do problema é obtida através das diferentes ferramentas CAD ou por outros meios de aquisição direta (por exemplo, scanners tridimensionais), para definir a região que representa o domínio. É importante verificar algumas considerações como: se é possível simplificar o domínio, se existe algum tipo de simetria ou se é necessário dividi-lo para estabelecer as condições de contorno.

4. Malha

Denomina-se criação da malha à divisão da região que representa o fluido em um número finito de volumes de controle para a solução das equações de conservação. A escolha da forma e tamanho desses volumes de controle dependerá da complexidade da geometria a analisar. Ambos os parâmetros, forma e tamanho dos volumes de controle, determinam o que é a chamada resolução da malha.

Voltando para a geometria, se ela for simples, é preferível uma malha estruturada uniforme. Isto é, quando as também denominadas células obedecem a uma regra de construção e apresentam sempre igual número de células vizinhas. O inconveniente deste tipo de malha é que não se consegue descrever com precisão as formas complexas. Para geometrias complexas são empregadas as malhas não-estruturadas, com a desvantagem de que é necessário construir uma matriz de conectividade entre os nós da malha. Na Fig. 3.12, são mostradas algumas das formas de células que podem ser adotadas.

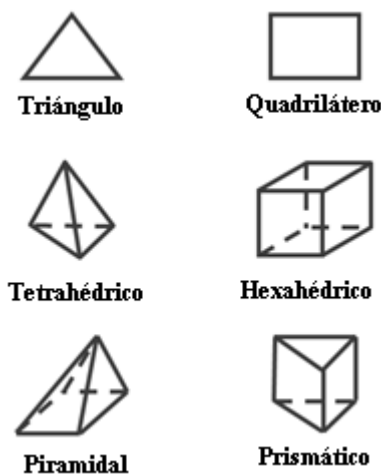


Figura 3.12 – Tipos de células utilizados em CFD.

As características da malha têm influência na precisão dos resultados e no tempo de cálculo. Geralmente uma malha mais fina poderá captar com maior precisão o fenômeno analisado. Em contraste, um refinamento desse tipo aumenta o número de elementos a serem calculados e, conseqüentemente, o tempo de cálculo. Nesse sentido, é importante definir qual é a ótima resolução de malha para cada região do domínio, tal que esta possa envolver a maioria dos aspectos geométricos de interesse e capturar todos os gradientes de variáveis procurados, com baixo custo computacional. Para isto, também é importante ter uma previsão, pelo menos aproximada, da solução do problema e identificar as regiões que necessitam maior atenção (regiões nas quais se tem a “intuição” de que possam apresentar altos gradientes, por exemplo).

Sendo esta uma etapa crítica é necessário definir uma estratégia para a criação da malha, a partir das considerações anteriores, que seja conveniente com a complexidade da geometria do problema estudado e se encontre dentro da capacidade de cálculo disponível.

5. Condições físicas

Dentro das condições físicas a considerar têm-se as propriedades do domínio, segundo o alcance da análise realizada (físicas, químicas, térmicas, elétricas, etc.). Nesse sentido, também se deve selecionar os modelos físicos apropriados (turbulência, combustão, entre outros), as condições ambientais do entorno onde se desenvolve a simulação e as condições de contorno do domínio.

6. Condições computacionais

Para começar a simulação são necessários os valores iniciais dentro do domínio, que podem ser impostos ou coletados de soluções prévias do problema. Parâmetros de controle e monitores para as variáveis devem ser definidos para observar a convergência da solução numérica.

7. Cálculo da solução

As equações de conservação discretizadas são solucionadas mediante um processo iterativo, que pode variar de acordo com o método de solução (*solver*) escolhido, até um critério de convergência previamente definido. A convergência pode ser atingida quando: i) mudanças nas variáveis de solução entre iterações atinjam um valor definido como desprezível, ii) as grandezas de interesse alcancem valores permanentes, ou iii) o número de iterações atinja um valor definido. A precisão da solução convergente dependerá dos modelos físicos apropriados e precisos, da resolução da malha e dos erros numéricos inerentes aos métodos numéricos utilizados.

8. Análise dos resultados

Os resultados obtidos são revisados para extrair aqueles dados que sejam relevantes. Para isto são utilizadas ferramentas de visualização que ajudarão a verificar se o domínio teve a resposta esperada (se houver) ou se descreve um novo comportamento. A partir destes resultados pode-se obter valores de forças e momentos, coeficientes médios de transferência de calor, ou balanços de fluxo, por exemplo.

9. Atualização do modelo

Inclusive quando os resultados apresentem as características e tendências esperadas, é desejável fazer as seguintes perguntas: Os modelos físicos adotados são apropriados? As condições de contorno definidas estão certas? A malha é a adequada? A redefinição de alguma das características anteriormente descritas poderá refletir na maior precisão dos resultados ou na economia do custo computacional.

3.4. Entorno de trabalho do *Workbench*®

A seguir, será apresentada uma breve descrição do ambiente do sistema *Workbench*®, utilizado neste trabalho. Ele é um ambiente integrado que permite a utilização

de módulos para diferentes tipos de análise. A janela principal do entorno de trabalho do *Workbench*® é mostrado na Fig. 3.13.

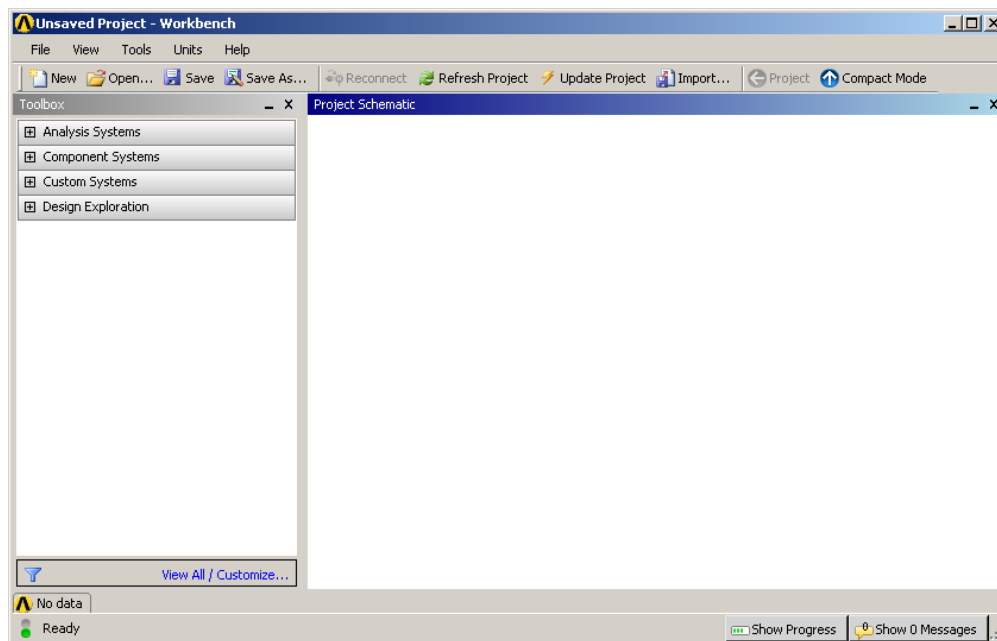


Figura 3.13 – Vista da janela principal do *Workbench*®.

Explorando os itens dos campos *Analysis Systems* (Sistemas de Análise) e *Component Systems* (Sistemas componentes), mostradas na Fig. 3.14.

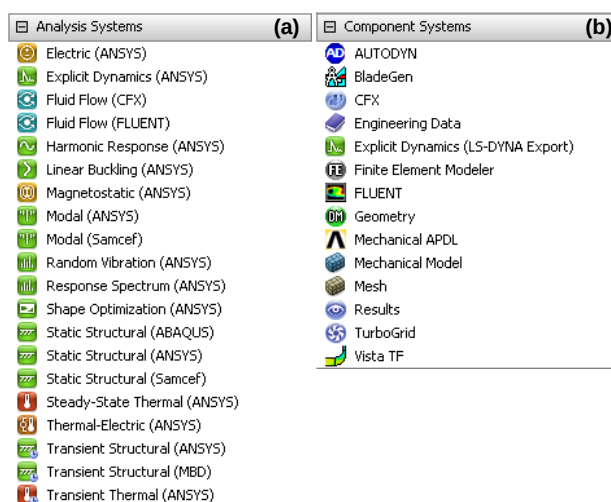


Figura 3.14 – (a) Tipos de análise disponíveis no *Workbench*®, (b) Componentes individuais.

Dentro dos sistemas de análise, observam-se os diferentes tipos de análise que podem ser realizados em blocos compactos. Estes blocos contêm integrados os processos de construção da geometria, geração da malha, definição de propriedades, etc. A Fig. 3.15

mostra alguns tipos de análises possíveis de serem feitas com os pacotes integrados no ANSYS®.

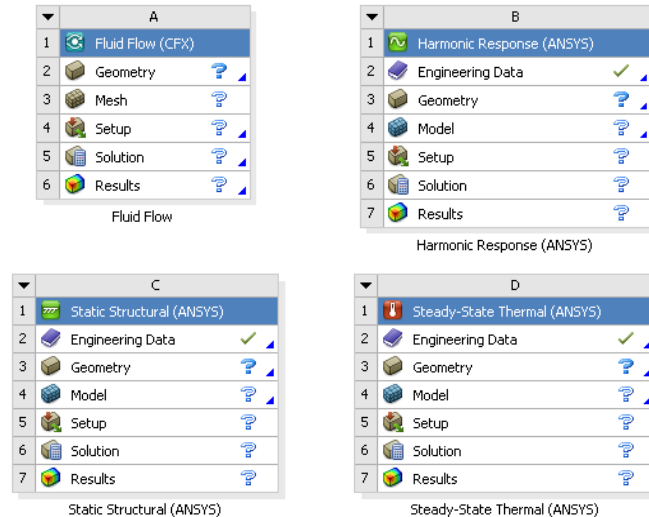


Figura 3.15 – Algumas das análises possíveis em ANSYS ®. (A) Escoamentos de fluidos, (B) Resposta harmônica, (C) Estruturas estáticas, (D) Térmica em regime permanente.

Uma das maiores vantagens do uso do *Workbench*® é a possibilidade de integrar diferentes tipos de análise para determinar todas as respostas em um sistema que inclua vários fenômenos que podem estar acontecendo simultaneamente. Por exemplo, a Fig. 3.16 mostra uma análise de sistemas integrados que coleta os dados e respostas em cada bloco individual de análise para serem usados no bloco de estudo seguinte.

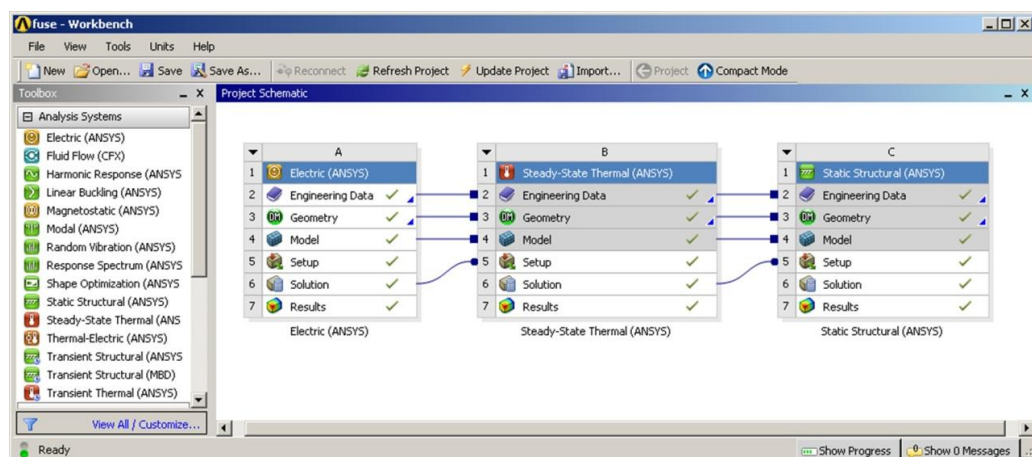


Figura 3.16 – Exemplo de integração de diferentes tipos de análises.

Voltando para a análise do fluido, o programa ANSYS®, v.12.0, inclui pacotes especializados para cada etapa da formulação de um problema a solucionar. Programas

padrões como o *Design Modeler*® para o desenho da geometria ou *Meshing*® para a criação da malha, podem ser substituídos por outros na obtenção de geometrias e malhas fora do entorno do ANSYS® e posteriormente importados a este. Neste trabalho foram utilizados ambos os programas padrões conforme será descrito mais adiante.

Para a solução de um problema de fluidodinâmica computacional, o software ANSYS® apresenta dois *solvers* para as equações governantes: *FLUENT*® e *CFX*®. Desenvolvidos paralelamente por companhias diferentes, hoje são parte do ANSYS®. Na Fig. 3.17 observa-se que os blocos de solução de ambos os programas são equivalentes em todos os itens. Inclusive, a geometria e a criação da malha podem ter uma origem comum em ambos os casos. As diferenças neste aspecto baseiam-se na configuração do problema (*SETUP*) e no método de solução empregado por cada programa (*SOLUTION*).

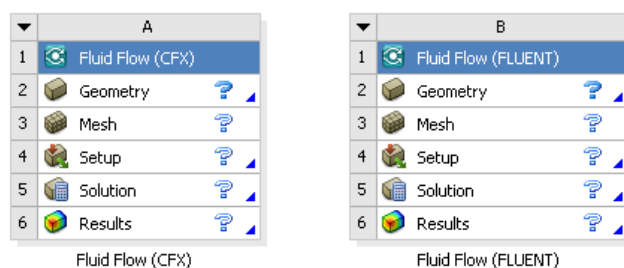


Figura 3.17 – Blocos componentes para simulação mediante *Workbench*®. (A) *CFX*® e (B) *FLUENT*®

3.5. Definição das características do problema

Do explicado nas seções 2.5 e 2.6 do capítulo anterior, muitas das pesquisas experimentais iniciais foram baseadas na análise de uma configuração física e geométrica análogas, isto é: um escoamento confinado em uma tubulação reta, submetido às diferentes condições de contorno, mencionadas anteriormente. Na Fig. 3.18 é mostrada em destaque a seção de interesse de estudos experimentais, isoladas do restante da bancada, que consideram um fluxo de calor constante na parede.

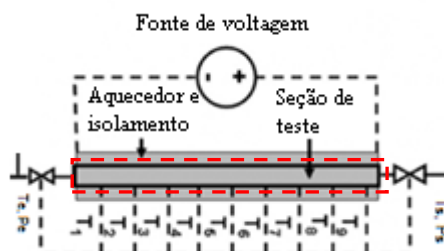


Figura 3.18 – Seção de interesse em bancadas experimentais para determinação da intensificação da transferência de calor, operando sob um fluxo de calor constante.

Sendo que a principal motivação é calcular a intensificação da transferência de calor de um escoamento de nanofluidos, o problema terá as seguintes características:

- Considera-se o escoamento de nanofluidos como um escoamento monofásico com as propriedades termofísicas intensificadas de acordo com os modelos teóricos apresentados anteriormente.
- Para a definição da geometria do problema, o escoamento de nanofluido será confinado em uma tubulação reta horizontal de parede lisa.
- A condição de entrada responsável pela convecção forçada do nanofluido será uma velocidade uniforme a uma temperatura constante definida.
- O escoamento estará submetido à condição de contorno mais comumente utilizada em pesquisas experimentais: fluxo de calor constante na parede. Neste caso, serão estabelecidos limites convenientes que garantam a não-mudança de fase.
- Será considerado o enfoque de entrada térmica. Isto é, a análise do comportamento térmico será feita quando o escoamento tenha desenvolvido totalmente seu perfil de velocidades.

Levando em conta estas considerações, será mostrada cada uma das etapas que constituem a solução do problema: criação da geometria, criação da malha, configuração do problema físico, solução numérica e visualização dos resultados. O esquema do projeto inicial no *Workbench*® é mostrado na Fig. 3.19, com cada bloco definido separadamente. Este conceito de módulos será útil mais adiante.

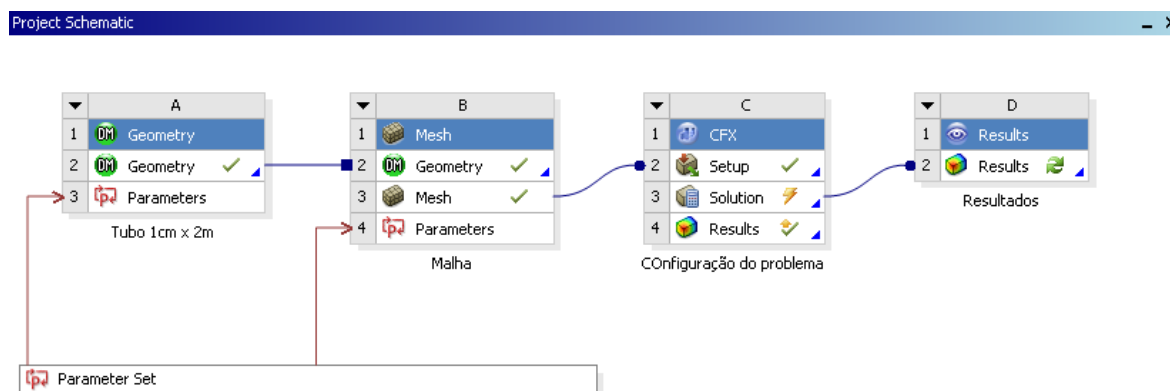


Figura 3.19 – Esquema do projeto para um escoamento de nanofluidos.

Este processo individual deverá ser reproduzido para cada nanofluido, solucionando o problema sob as mesmas condições, entretanto com as propriedades termofísicas modificadas.

3.5.1. Criação da geometria

Sendo a geometria do problema uma tubulação reta, uma primeira aproximação pode ser a simplificação da análise a uma seção bidimensional do tubo com condição de axissimetria. Neste sentido é importante destacar que uma diferença entre o *FLUENT*® e o *CFX*® é que o primeiro permite realizar análises em geometrias bidimensionais diretamente. No *CFX*®, a geometria tridimensional se aproxima a uma bidimensional com espessura de uma célula de dimensões convenientes.

Usando a aplicação *Designer Modeler*® do *ANSYS*® é possível criar geometrias tanto bidimensionais como tridimensionais. Para o uso do *CFX*®, a criação da geometria implica desenho de um esboço bidimensional para a formação do corpo tridimensional. A Fig. 3.20 mostra o processo de extrusão para o círculo (de 10 mm de diâmetro) desenhado para obter o tubo que representa o domínio do nanofluido.

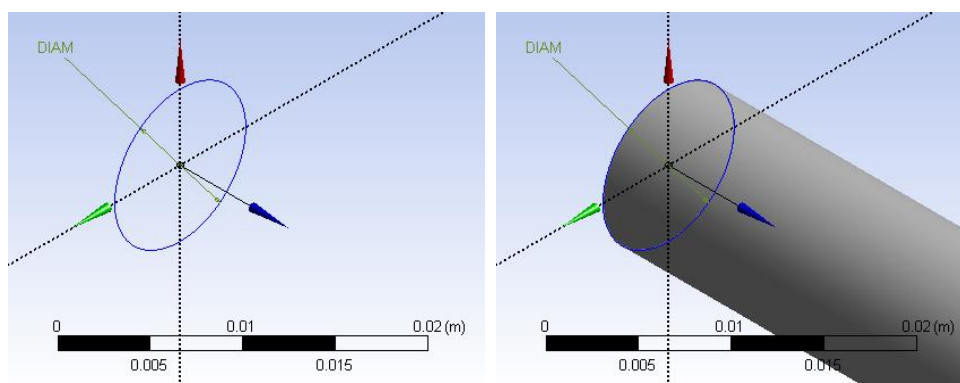


Figura 3.20 – (a) Esboço da seção tubular, (b) volume formado por extrusão.

No volume que define o domínio são definidas três seções: uma de entrada, outra de testes e a última a seção de saída. A primeira seção de entrada deve ter o comprimento suficiente para garantir que o escoamento esteja hidrodinamicamente desenvolvido. Este comprimento é determinado mediante a Eq. (2.49) para o caso de regime laminar e a Eq. (2.52) para o caso de regime turbulento. Deste modo, para um número de Reynolds máximo de 1000, obteve-se o máximo valor para o comprimento de entrada igual a 0,5m. Em regime turbulento, como mencionado anteriormente, este comprimento é menor e igual a 0,1m. Desse modo, o mínimo comprimento para garantir o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento será adotado como $L_{ent} = 0,5m$. Logo após a seção de entrada, tem-se a seção de interesse: com comprimento definido neste caso como $L_{teste} = 2m$. Finalmente, e por questão de segurança, é definida uma pequena seção de saída ($L_{saída} = 0,1m$), para não ter uma distorção dos resultados nos volumes finais da seção de teste (nas quais finaliza a condição de contorno). Na Fig. 3.21 é mostrada esquematicamente cada seção.

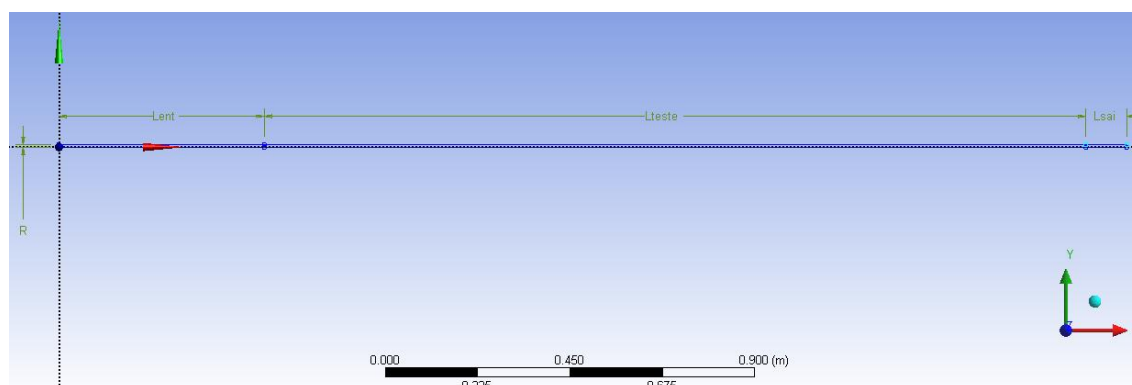


Figura 3.21 – Esquema das seções definidas para a simulação.

Para definir cada seção, uma vez criado o domínio cilíndrico, é desenhada uma forma retangular sob o tubo (mostrado na Fig. 3.22), que será projetado sobre sua superfície com a opção *Imprant Faces* do *Design Modeler*®. Este procedimento separa a superfície do domínio para cada seção sem afetar o volume do domínio.

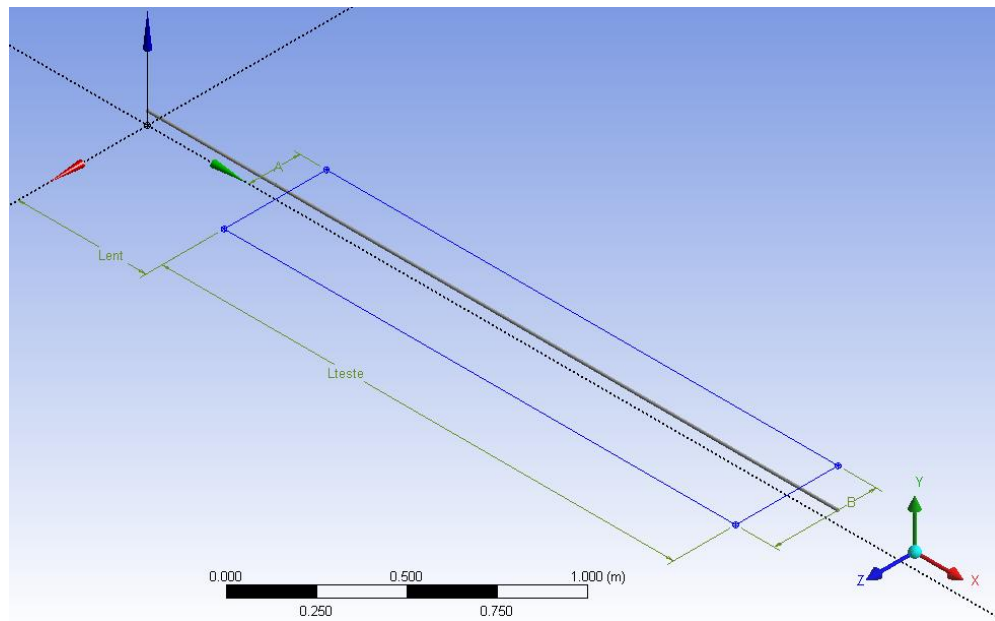


Figura 3.22 – Criação das superfícies das seções.

A Fig. 3.23 mostra as três superfícies laterais definidas. A primeira e a última correspondem às seções de entrada e saída, respectivamente. Nestas, as condições de contorno serão definidas como parede adiabática. A seção intermediária (de testes, em verde) será a que tenha a condição de contorno relativa à energia (fluxo de calor constante).

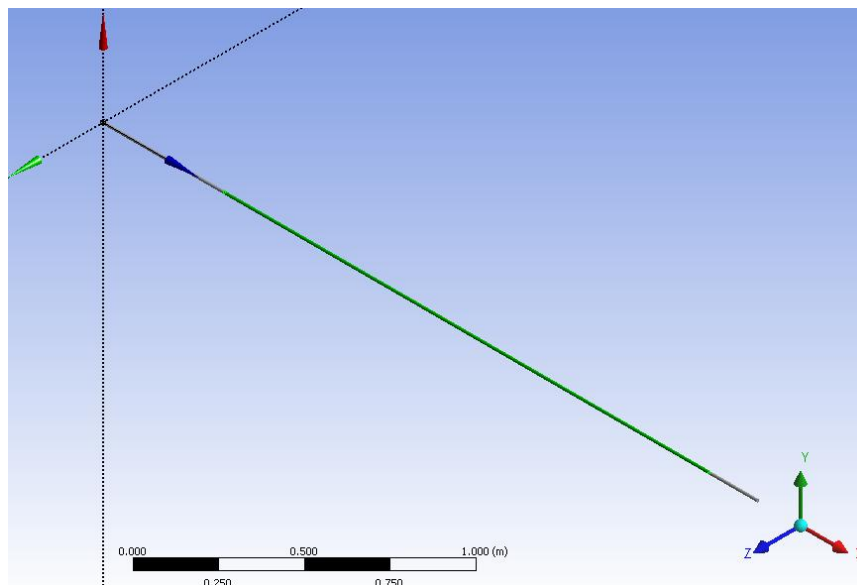


Figura 3.23 – Seções definidas a o condicionamento do problema.

Além das superfícies mencionadas, têm-se as superfícies correspondentes às de entrada e saída do escoamento. No total, o problema apresenta cinco superfícies que

precisam de condições de contorno (estas serão dadas mais adiante, na seção 3.3.5) e que podem ser nomeadas para obter a facilidade de manipulação posteriormente.

3.5.2. Geração da malha numérica

Com a geometria pronta, é necessário criar a malha tridimensional do problema. Para isto, é usada a ferramenta *Meshing*® do próprio ANSYS. Dada a geometria axissimétrica do problema, a malha sugerida é uniforme no sentido longitudinal e radial na seção do tubo (Maíga et al., 2004; Bianco et al., 2009). O programa possui uma aplicação que gera a malha de maneira automática, porém esta não é apropriada para este caso.

Nas opções de Detalhes da Malha (janela *Details*) deve se definir primeiro as preferências da física do problema e o solver a ser utilizado. Para este caso, ambas as opções são definidas em *CFD* e *CFX*®, respectivamente. O seguinte passo é definir um método de criação de malha. Segundo o Manual de Usuário do *CFX*® 12.0 (2009), este tipo de geometria gerada via extrusão obtém melhores resultados pelo método de ‘varredura’ (*Sweep Method* em inglês) que considera o corpo de seção projetada ao longo de um trajeto. Quando a malha é gerada só com este método, o número de divisões é definido automaticamente. Na Fig. 3.24 é mostrada a malha não regular na seção, mas com divisões uniformes no sentido axial.

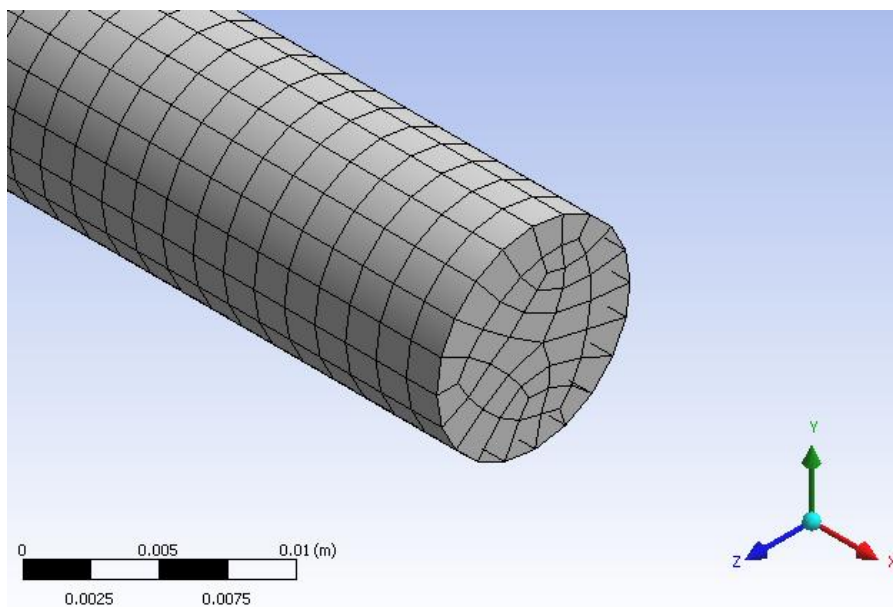


Figura 3.24 – Vista da malha gerada automaticamente pelo *Meshing* ®

Sendo que o fenômeno no sentido axial não precisa de uma malha tão fina, considera-se uma redução do número de divisões ao longo do tubo. É estabelecido um valor de 150 divisões. A Fig. 3.25 mostra a malha modificada no sentido axial.

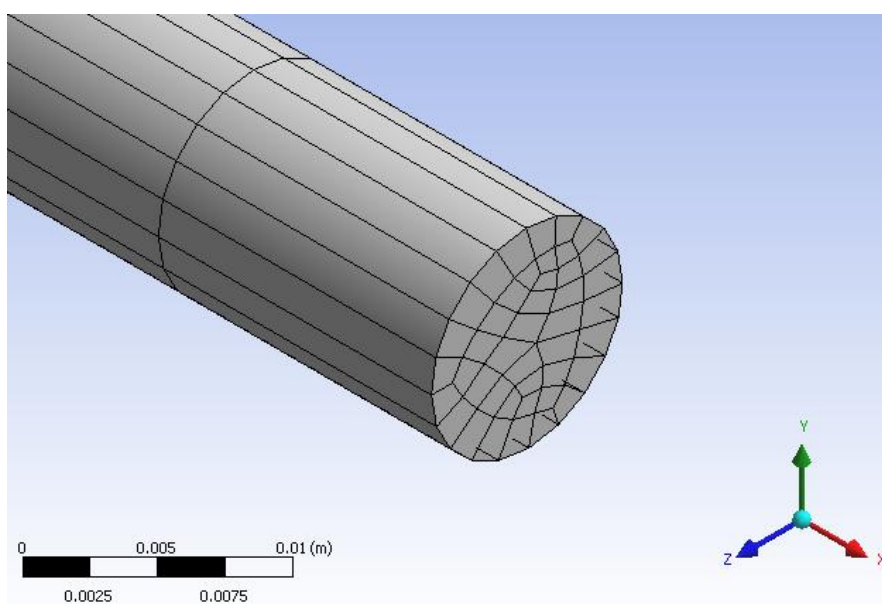


Figura 3.25 – Vista da malha com menor número de divisões longitudinais.

Por último, deve-se reformar a malha nas seções do tubo. Para isto é adicionado mais um processo, denominado de *Inflation*, que permite uniformizar este tipo de geometria. Com o *Inflation* consegue-se uniformizar a malha no sentido radial e também obter um refino nas regiões próximas às paredes do tubo, como mostrado na Fig. 3.26.

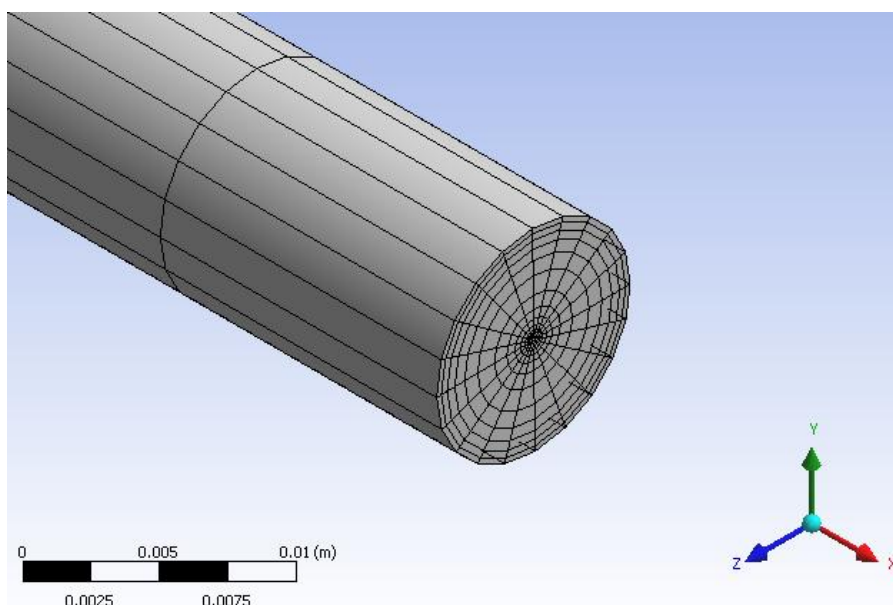


Figura 3.26 – Vista da malha refinada pelo processo *Inflation*.

Com estas especificações, a malha obtida possui 36450 elementos. Posteriormente, na etapa de atualização do modelo, poderá ser verificado se é necessário modificar a resolução da malha.

3.5.3. Configuração do problema físico em regime laminar

No terceiro bloco do esquema apresentado anteriormente na Fig. 3.18, tem-se o primeiro elemento, denominado *SETUP*. A Fig. 3.27 mostra uma vista geral da janela principal do CFX® com a geometria do tubo. No lado esquerdo, pode-se observar a única região tridimensional do modelo (o domínio) e as regiões bidimensionais que possui a geometria, onde se destacam as três seções divididas na superfície do domínio, e todas as outras superfícies, nomeadas: *INLET* (entrada), *OUTLET* (saída), *REG_ENT* (superfície da região de entrada), *REG_SAI* (superfície da região de saída) e *WALL* (parede).

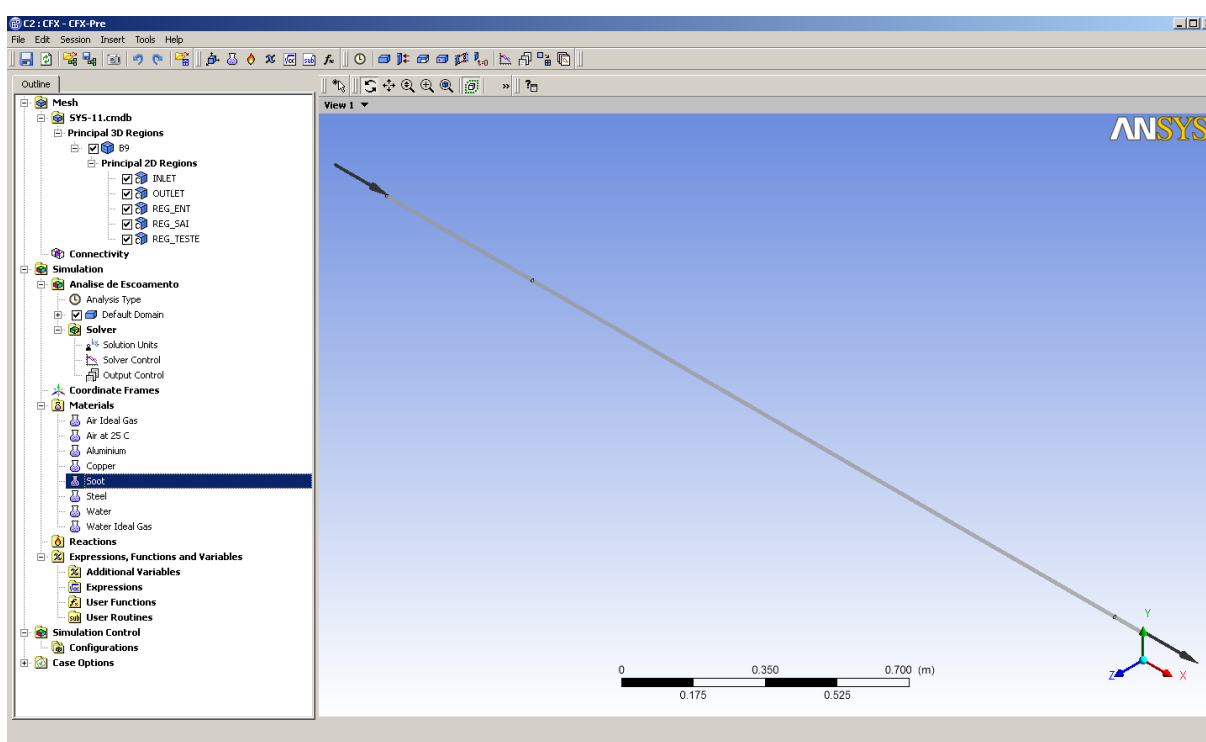


Figura 3.27 – Janela principal do CFX®

Na opção *Simulation* encontra-se o tipo de análise que será realizada (*Flow Analysis*). Assim, são definidas as seguintes características:

- Tipo de análise (*Analysis Type*): Regime Permanente (*Steady state*)
- Domínio padrão – Definições básicas (*Default Domain – Basic Settings*)
 - Local (Location): região tridimensional importada ('B9')
 - Tipo de domínio (*Domain Type*): *Fluid Domain* (domínio fluido)
 - Marco de referência (*Coordinate Frame*): Coord 0 (o sistema de coordenadas padrão da geometria)
 - Material: Água
 - Morfologia: Fluido contínuo

- Pressão de referência: 1 atm.
- Modelo do fluido
 - Transferência de calor (*Heat Transfer*): Thermal Energy
 - Turbulência (*Turbulence*): Laminar

O CFX® permite adicionar materiais novos à biblioteca pré-definida. Isto será importante no momento de definir todas as propriedades dos nanofluidos que serão simuladas.

Com as especificações gerais do tipo de análise estabelecidas, passa-se a definir as condições de contorno para cada região do domínio. Na Tab. 3.8 são mostradas as regiões do domínio e as condições nelas impostas.

Tabela 3.8 – Condições de contorno sobre o domínio do fluido em regime laminar.

Região	Condição	Observação
INLET	Velocidade Perpendicular Uniforme	<i>Valor a partir do Re</i>
OUTLET	Pressão Uniforme	<i>Relativa com a ambiente</i>
REG_ENT	Parede	<i>Lisa, fixa, adiabática</i>
REG_SAI	Parede	<i>Lisa, fixa, adiabática</i>
REG_TESTE	Parede	<i>Lisa, com q''</i>

Cada condição é inserida no Domínio Padrão (*Default Domain*) da pasta Análise de Escoamento. Sendo que o parâmetro padrão para comparar o comportamento de cada escoamento de nanofluidos é o número de Reynolds, as velocidades de entrada serão calculadas a partir deste, variando em cada caso, por causa das propriedades modificadas do nanofluido. Para um escoamento de água com $Re = 250$, o valor calculado da velocidade normal de entrada no tubo é $u = 0,0223 \text{ m/s}$. A condição de contorno nesta região estará complementada com a informação da temperatura, neste caso $T_{\text{ent}} = 25^\circ\text{C}$ (298,15 K). Esta condição de temperatura será a mesma para todos os nanofluidos a serem simulados. A pressão relativa, na saída, é estabelecida em zero, pois não é necessário o valor exato da pressão nesse ponto, mas a queda gerada pelo escoamento do fluido. As condições de parede das regiões de entrada e saída são consideradas de não-eskorregamento e com a superfície lisa. Na região de testes a parede é considerada lisa, porém com a condição de fluxo de calor constante, ingressando através dela para o nanofluido (igual a 5000 W/m^2 e que será mostrado aqui como exemplo).

Uma vez que todas as condições de contorno estejam estabelecidas, pode-se definir alguns parâmetros de controle para a convergência da simulação como o número de iterações ou mediante um valor mínimo para o residual de cada variável (neste caso, o erro quadrático médio). Estes parâmetros são definidos na opção *Solver Control* na pasta *Solver*, dentro de *Análise de escoamento*.

Com isto, o elemento *SETUP* do bloco *CFX®* está totalmente definido e é possível continuar com o processo de solução numérica. O programa padrão usado é o *CFX-Solver Manager®*, que permite começar o cálculo numérico do escoamento a partir das condições iniciais (se for a primeira análise) ou de informações dadas (cálculos de simulações prévias, por exemplo). Quando iniciado o cálculo, o programa mostra gráficos que possibilitam o monitoramento dos parâmetros de controle estabelecidos. Nessas condições, são mostrados os valores residuais (erros) das variáveis principais do estudo (neste caso, variáveis de continuidade e transferência de calor). O tempo de cálculo dependerá, principalmente, do número de elementos da malha.

A etapa final é a visualização dos resultados obtidos mediante a solução numérica do escoamento. Para isto será usado o programa padrão *CFD – Post*. Com este programa, podem ser gerados imagens e gráficos baseados nos resultados obtidos para o domínio inteiro. Por exemplo, na Fig. 3.28 observa-se um gráfico (do tipo contorno) do campo de velocidades para todo o tubo. Neste caso, as escalas foram modificadas para uma melhor visualização.

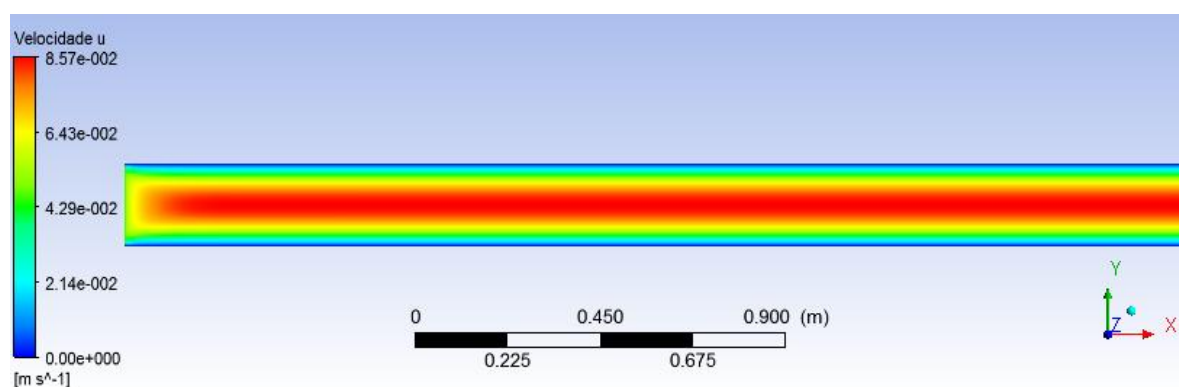


Figura 3.28 – Campo de velocidades ao longo de uma seção transversal do tubo.

Do mesmo modo, pode ser visualizado o campo de temperaturas, como é mostrado na Fig. 3.29, que tem a escala no eixo 'y' aumentada para melhor visualização. Observa-se que o valor máximo de temperatura é atingido pouco antes do final do domínio definido. A seção final com menor temperatura corresponde à região de saída definida anteriormente.

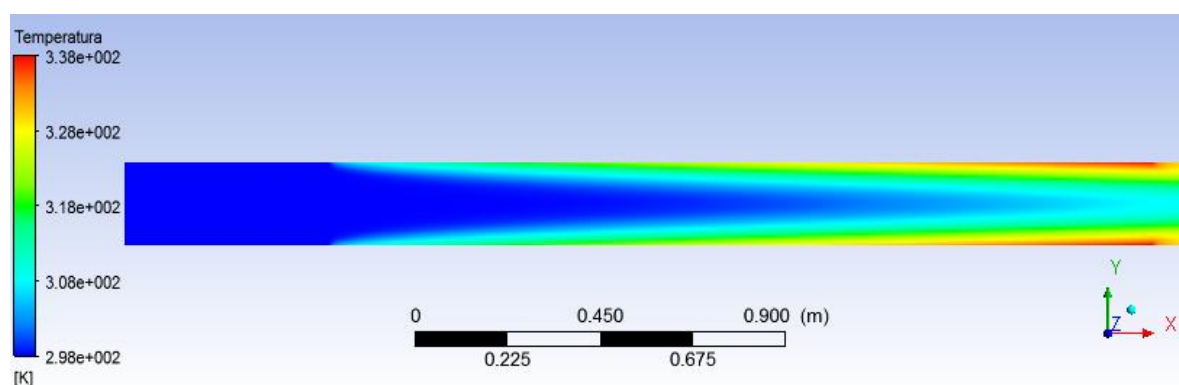


Figura 3.29 – Campo de Temperaturas ao longo de uma seção transversal do tubo.

Uma das utilidades do CFD-Post permite a possibilidade de criar gráficos baseados nos resultados calculados em um local definido. Assim, por exemplo, é possível criar uma linha que coincida com a linha central da tubulação e plotar os valores da velocidade sobre este local em particular. Na seção *Report*, é inserido um gráfico novo (*Chart*), com o nome de Velocidade Linha Central. Nas opções do gráfico seleciona-se o local 'Linha Central' (previamente criado) e se definem as variáveis para os eixos 'x' e 'y' como X (coordenadas longitudinais) e Velocidade, respectivamente. O resultado é mostrado na Fig. 3.30.

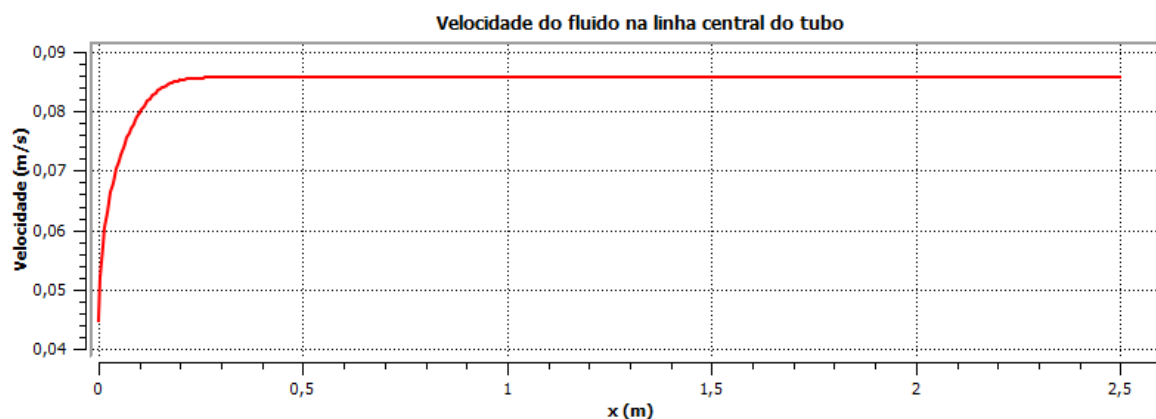


Figura 3.30 – Velocidade da linha central.

Outro exemplo da vantagem de se usar estas geometrias auxiliares pode ser observado na Fig. 3.31, que ilustra a variação da temperatura ao longo do tubo em duas regiões diferentes. A primeira: a linha central anteriormente criada, e a segunda: uma nova linha alocada na proximidade da parede (isto é, com coordenada 'y' igual ao raio do tubo).

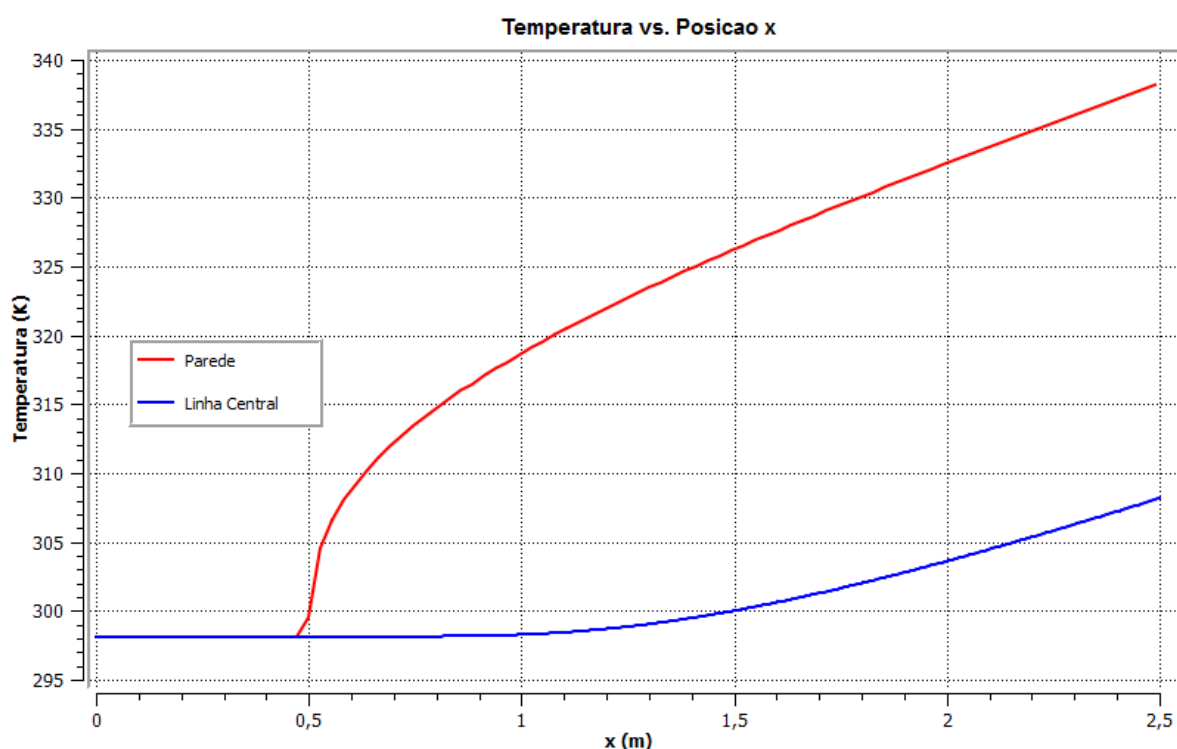


Figura 3.31 – Comportamento da temperatura na linha central e na parede do tubo.

Do gráfico, verifica-se o comportamento descrito na seção 2.5.5 (ver Fig. 2.13). Cabe destacar que, neste caso, foi mostrado o comportamento da temperatura sobre a linha central do domínio fluido e não a temperatura média.

Desta forma, através da criação de geometrias auxiliares, podem ser obtidas as temperaturas médias do fluido em seções determinadas (as quais serão previamente definidas). Sendo a seção de teste a de maior interesse (a parte aquecida da tubulação), no presente trabalho foram criadas 21 seções transversais (uma a cada dez centímetros), como apresentado na Fig. 3.32.

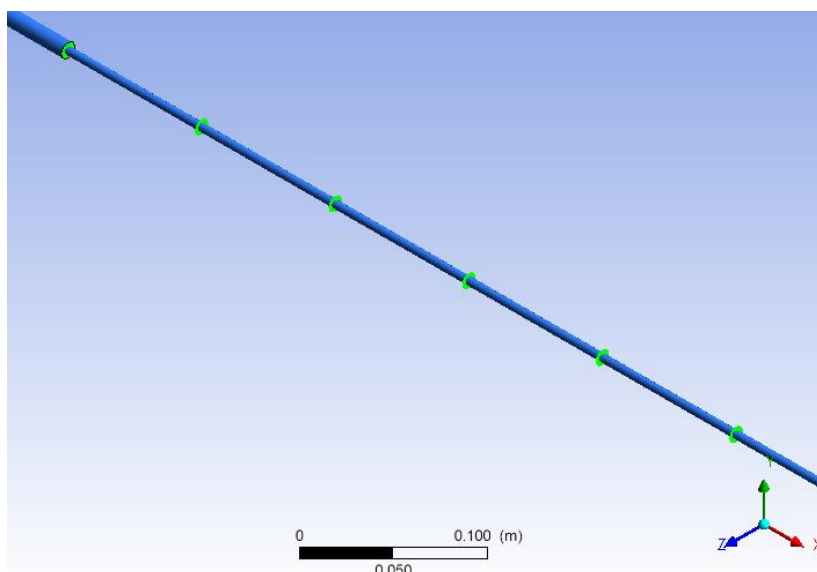


Figura 3.32 – Vista esquemática da posição das seções de controle.

Outra característica importante do CFX® é que permite construir novas variáveis com base naquelas já definidas pelo programa (como velocidade, temperatura, pressão, etc.) e outras definidas pelo usuário. Para isto, primeiro é criada uma Expressão (*Expression*) que relacione todas as variáveis desejadas. Em seguida, é criada uma Variável (*Variable*) a partir da expressão (ou das expressões correspondentes). Desse modo podem ser criadas expressões para o número de Reynolds, o número de Prandtl ou o número de Graetz (ver seção 2.6.5).

Com todos os valores do campo de velocidade, temperatura e pressão, o passo seguinte é simular cada escoamento para um nanofluido diferente. Neste sentido, é extremamente útil a capacidade do *Workbench*® para trabalhar com módulos, pois a maioria das condições permanece constante. Apenas são necessárias as atualizações do material usado (o nanofluido) e as condições de velocidade de entrada e de fluxo de calor na parede. Os resultados obtidos para cada nanofluidos serão processados mediante as equações e correlações dadas na seção 2.6 para conseguir as intensificações da transferência de calor segundo as condições estabelecidas até aqui.

3.5.4. Configuração do problema físico em regime turbulento

Para o caso das simulações em regime turbulento, será utilizado o *solver* FLUENT®. Isto, devido à sua maior robustez em problemas desse tipo. Para garantir melhores resultados e aproveitar a facilidade oferecida pelo FLUENT®, a geometria do problema foi simplificada a uma região bidimensional retangular com condição de axissimetria, mantendo as mesmas regiões definidas para as condições de contorno.

Para esta geometria, a malha foi definida com 30 divisões na direção radial e tamanho de célula de 6 mm na direção axial, também com um refino na região próxima à parede. Desse modo, a malha possui 12050 elementos. As regiões para as condições de contorno neste caso são arestas definidas na criação da geometria, nomeadas na Tab. 3.9, que variam apenas no aumento da condição de axissimetria.

Tabela 3.9 – Condições de contorno sobre o domínio do fluido em regime turbulento.

Região	Condição	Observação
INLET	Velocidade Perpendicular Uniforme	<i>Valor a partir do Re</i>
OUTLET	Pressão Uniforme	<i>Relativa com a ambiente</i>
REG_ENT	Parede	<i>Lisa, adiabática</i>
REG_SAI	Parede	<i>Lisa, adiabática</i>
REG_TESTE	Parede	<i>Lisa, com q'' constante</i>
CENTERLINE	Axissimetria	<i>Linha central do tubo</i>

A Fig. 3.33 mostra a janela principal do *FLUENT*® com uma vista parcial da malha gerada para este caso. Observam-se também as opções no lado esquerdo, tanto para a configuração (*Problem Setup*) como para a solução (*Solution*). A configuração geral do problema é estabelecida com as opções que ilustram a mesma Fig. 3.33 (Tipo de solucionador: Baseado na pressão; Velocidades: absolutas; Regime permanente; Axissimétrico).

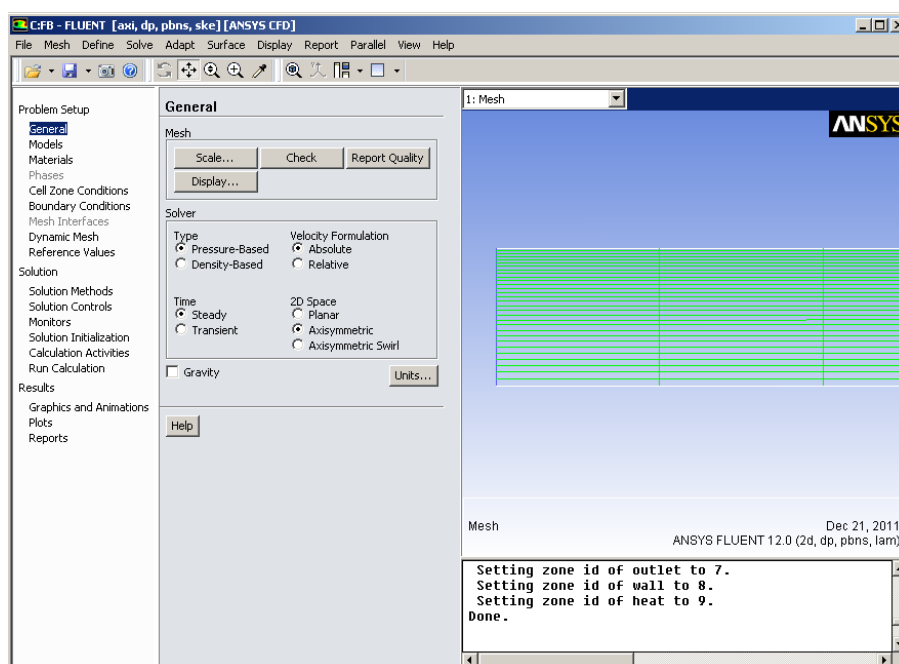


Figura 3.33 – Vista da janela principal do FLUENT®

A seguir, são definidos: os modelos (conjunto de equações) a serem empregados (Fig. 3.34a) e os materiais utilizados na simulação (Fig. 3.34b) que foram adicionados com antecedência na biblioteca de materiais padrão do *FLUENT®*. Cada nanofluido foi nomeado segundo as denominações da Tab. 3.7.

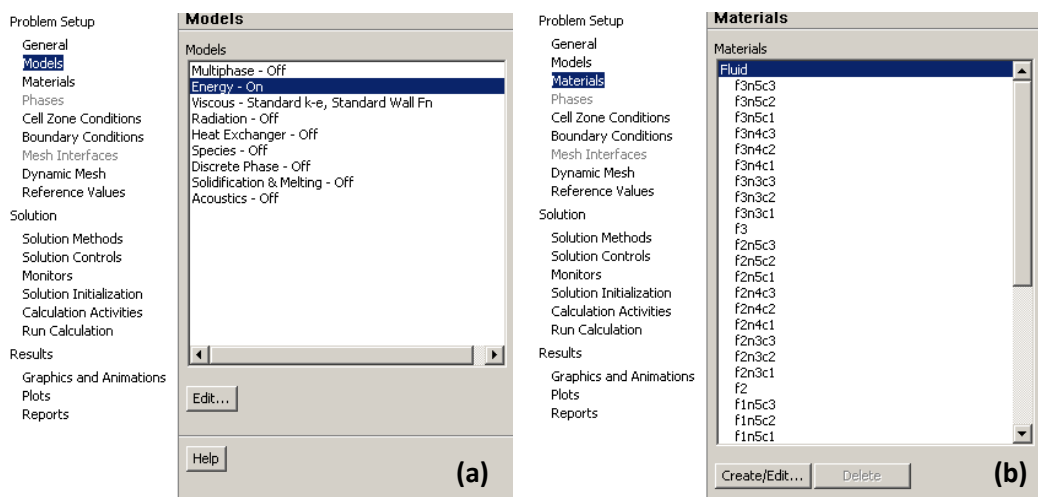


Figura 3.34 – Definição dos modelos (a) e dos materiais (b) a utilizar nas simulações.

Neste caso, para simular o escoamento do nanofluido em regime turbulento foi selecionado o modelo de turbulência semi-empírico $k - \varepsilon$, que considera a energia cinética contida nas flutuações (k) e a taxa de dissipação dessa energia em calor (ε). Este modelo, além de ser o sugerido para problemas de baixa complexidade pelo Guia de Usuário do *FLUENT®* (Fluent Inc., 2006), tem sido evidenciado em múltiplas pesquisas numéricas, dentre eles, os trabalhos de Maíga et al. (2004) e Bianco et al. (2009). Maiores detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em Launder e Spalding (1972).

Para o condicionamento da velocidade de entrada, além do valor desta, é necessário fornecer os valores de Intensidade de Turbulência (I), dado pela Eq. 3.10, e do Comprimento de Escala de Turbulência (l), dado pela Eq. 3.11.

$$I = \frac{u'}{u_{média}} = 0,16(Re_D)^{-1/8} \quad \text{Eq. (3.10)}$$

$$l = 0,07D \quad \text{Eq. (3.11)}$$

Onde u' é a velocidade flutuante característica da turbulência.

No primeiro caso, para o valor de $Re = 10000$, a Intensidade de turbulência calculada foi 0,0506, e para $Re = 20000$, foi 0,046397. Estes valores são próximos ao sugerido pelo

próprio Guia do Usuário do FLUENT® (5%), o qual foi selecionado para todas as simulações. O valor do Comprimento de Escala de Turbulência calculado a partir da geometria foi 0,0007. Estes valores são inseridos na janela de definição da velocidade de entrada, como ilustrado na Fig. 3.35.

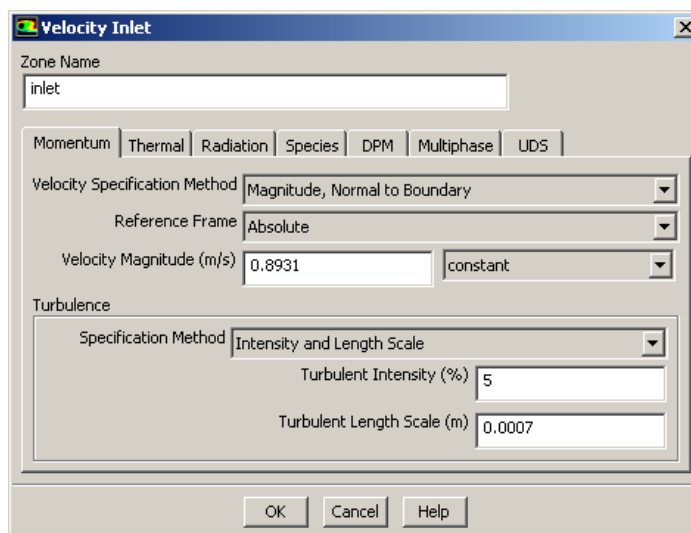


Figura 3.35 – Janela de definição da velocidade de entrada (regime turbulento).

De modo similar são condicionadas as demais regiões de contorno, sendo a mais importante a região da parede da tubulação submetida ao fluxo de calor constante, mostrado na Fig. 3.36.

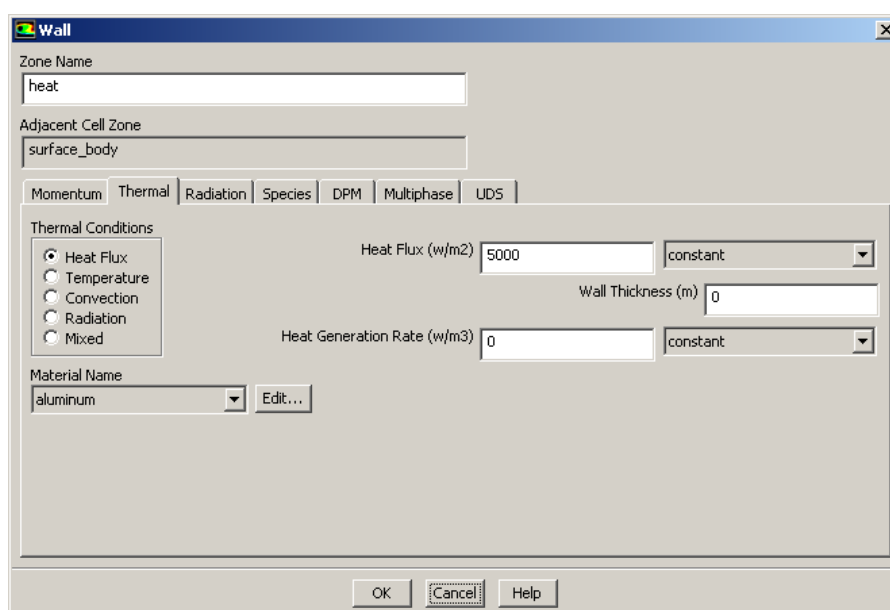


Figura 3.36 – Definição do fluxo de calor constante (regime turbulento).

Depois da definição da velocidade, esta deve ser inicializada na opção *Solution Initialization* antes de passar para a solução do problema, executada na opção *Run Calculation*, na qual é definido o número de iterações e inicia à simulação.

Os resultados são visualizados através de um novo bloco *Results* na janela principal do Workbench®, que terá as mesmas características do mencionado, na seção anterior, para o caso do escoamento em regime laminar.

Finalmente, o bloco *Setup* será reproduzido para cada nanofluido, mudando o valor da velocidade de entrada para manter o Reynolds constante, e os resultados serão agrupados segundo o fluido base e a nanopartícula utilizada. A Fig. 3.37 ilustra um dos arquivos criados com a definição completa das simulações para um nanofluido dado, com o valor do *Re* definido e em regime turbulento.

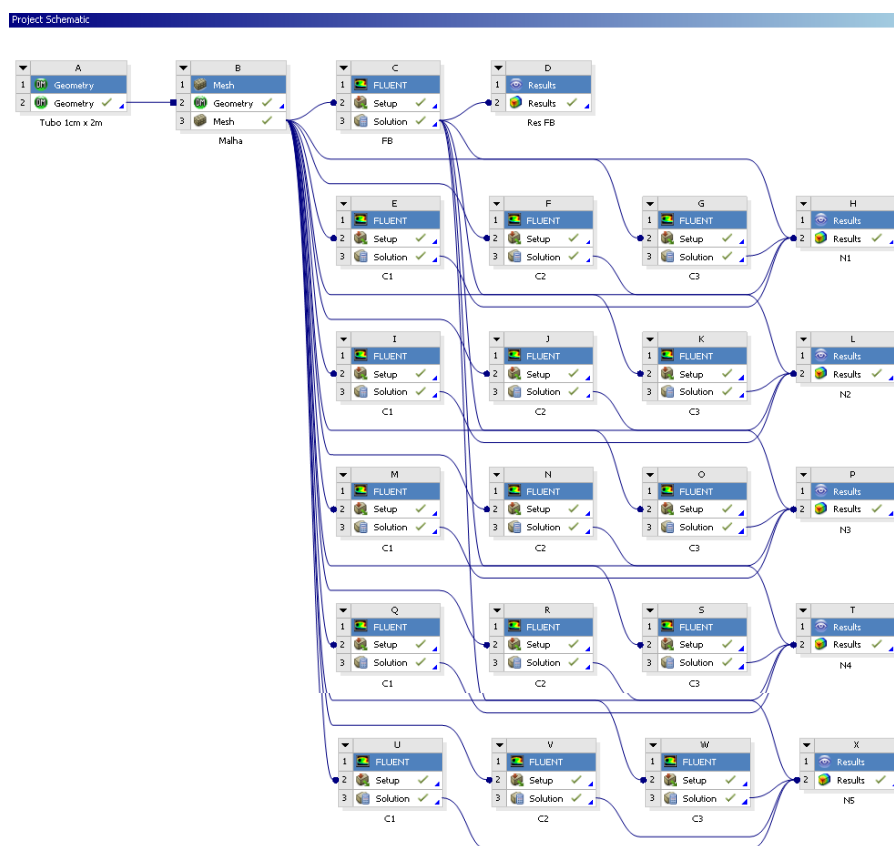


Figura 3.37 – Esquema do projeto para a simulação dos nanofluidos baseados em água, escoando em regime turbulento.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas, primeiramente, as variações das propriedades dos nanofluidos, com o objetivo de mostrar as principais diferenças encontradas devido à adição de nanopartículas no fluido base.

De maneira semelhante serão apresentados os resultados obtidos por intermédio da simulação computacional do escoamento dos nanofluidos. Como mencionado no capítulo anterior, os resultados da simulação numérica são dados em termos dos campos de velocidade, temperatura e pressão no domínio inteiro da geometria do problema. Devido à grande quantidade de dados obtidos, serão apresentados apenas os casos mais representativos e aqueles que contenham alguma informação relevante.

Finalmente, serão visualizadas as tendências do coeficiente de transferência de calor por convecção para todos os nanofluidos, agrupados por fluido base.

4.2. Variação das propriedades

O primeiro efeito evidenciado no cálculo das propriedades modificadas do nanofluido foi a influência que possuem as propriedades iniciais de ambas as fases envolvidas na síntese do nanofluido. Este tópico foi desenvolvido de maneira mais geral na seção 3.2 do capítulo anterior. As variações da massa específica, viscosidade, condutividade térmica e calor específico dos nanofluidos em função das razões entre as propriedades da

nanopartícula e fluido base correspondentes são mostrados nas Eqs. (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4), respectivamente.

$$\rho_{int} = \frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}} = (1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r \quad (4.1)$$

$$\mu_{int} = \frac{\mu_{nf;Bat.}}{\mu_{fb}} = (1 + 2,5\phi_{np} + 6,5\phi_{np}^2) \quad (4.2)$$

$$k_{int} = \frac{k_{nf;Max.}}{k_{fb}} = \frac{2+k_r+2\phi_{np}(k_r-1)}{2+k_r-\phi_{np}(k_r-1)} \quad (4.3)$$

$$(C_p)_{int} = \frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_{fb}} = \frac{(1-\phi_{np})+\phi_{np}\rho_r(C_p)_r}{(1-\phi_{np})+\phi_{np}\rho_r} \quad (4.4)$$

Por conveniência, se manteve o subscrito *int* para o caso do calor específico, apesar de diminuir com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas.

Com base nas anteriores equações são construídas as Figs. 4.1, 4.2 e 4.3, que ilustram as tendências da variação de propriedades dos nanofluidos compostos por água como fluido base e nanopartículas de prata, cobre e ferro, respectivamente.

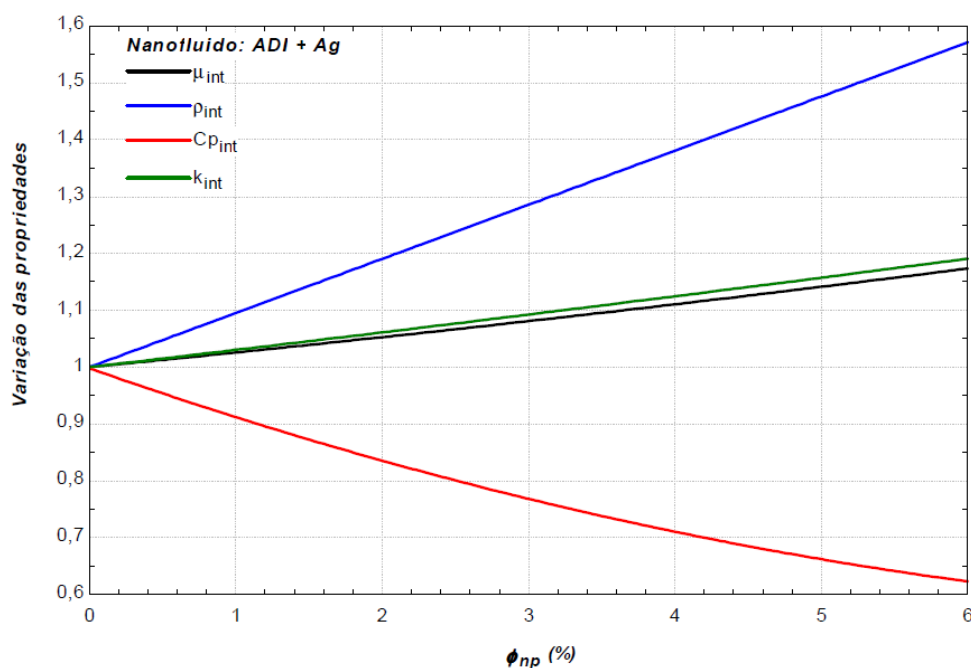


Figura 4.1 – Tendência das propriedades para o nanofluido F1N1 variando com a concentração volumétrica.

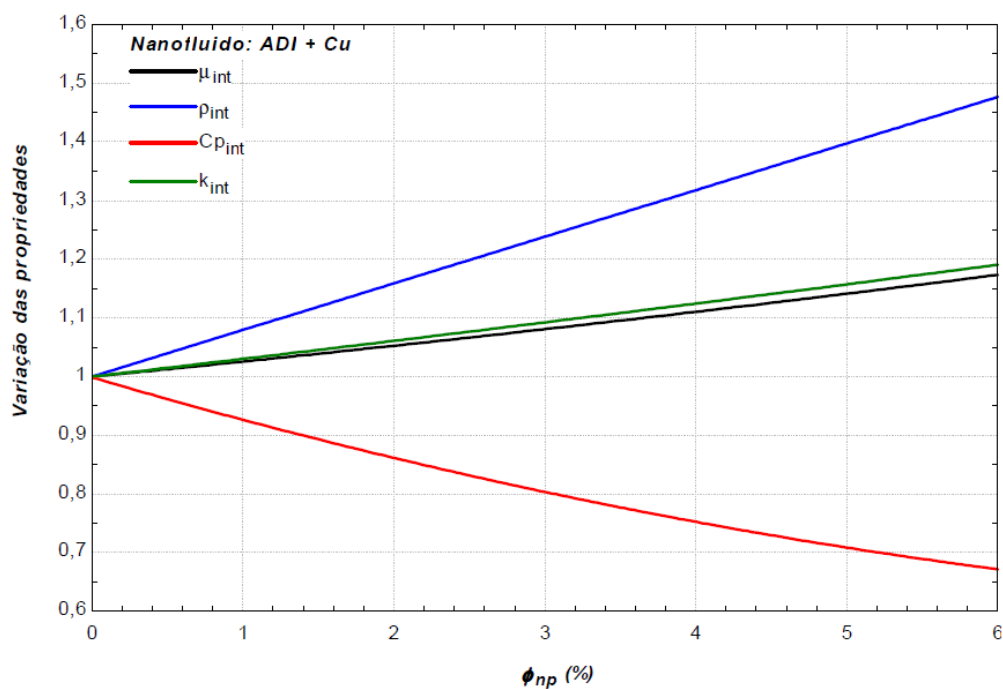


Figura 4.2 – Tendência das propriedades para o nanofluido F1N2 variando com a concentração volumétrica.

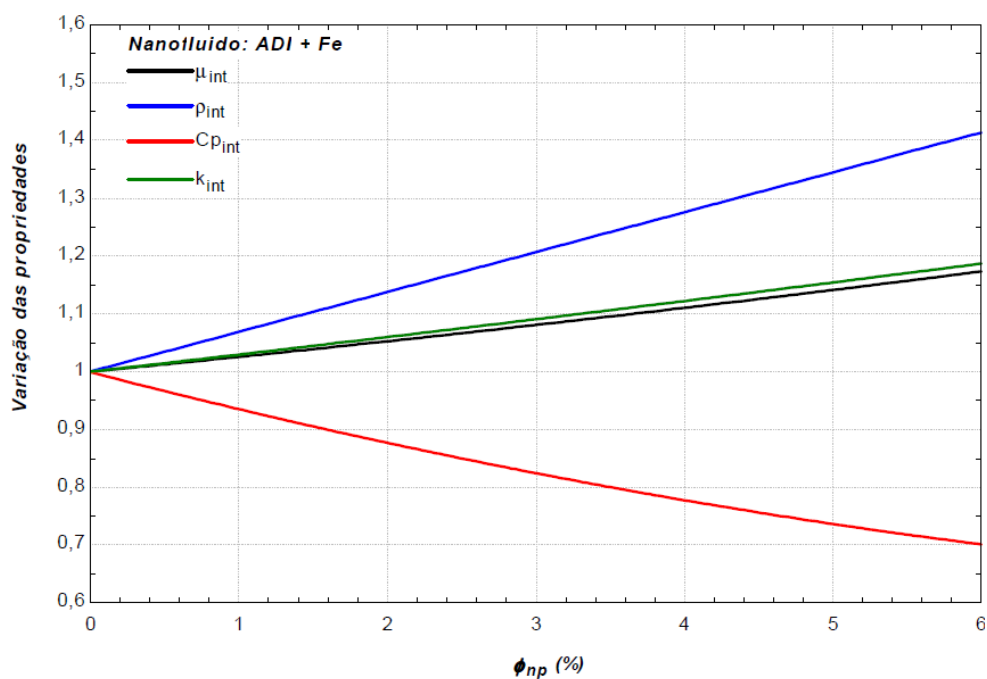


Figura 4.3 – Tendência das propriedades para o nanofluido F1N3 variando com a concentração volumétrica.

Nas figuras anteriores, pode-se observar o grande aumento da densidade, que atinge um incremento de mais de 45% na faixa de concentrações utilizada no presente trabalho (1%-5%). O segundo em destaque é a grande diminuição do calor específico, com um valor máximo de quase 35% para o nanofluido de água como fluido base com nanopartículas de prata dispersas. A intensificação da condutividade térmica alcança um valor de aproximadamente 15% para os três nanofluidos referidos. Por outro lado, a viscosidade apresentará sempre a mesma tendência de intensificação por ser função unicamente da concentração volumétrica, conforme a Eq. (4.2) com um valor máximo de aproximadamente 15%. Isto será evidenciado para todos os demais nanofluidos.

As Figs. 4.4 e 4.5 mostram as tendências das variações das propriedades dos nanofluidos compostos por água como fluido base e nanopartículas dispersas de alumina e óxido de cobre, respectivamente. Observa-se que tanto as variações da massa específica como do calor específico são menos pronunciadas do que os nanofluidos anteriormente mencionados, que contêm nanopartículas metálicas dispersas em água. As intensificações de condutividade são menores, porém ainda estão próximos ao valor de 15%.

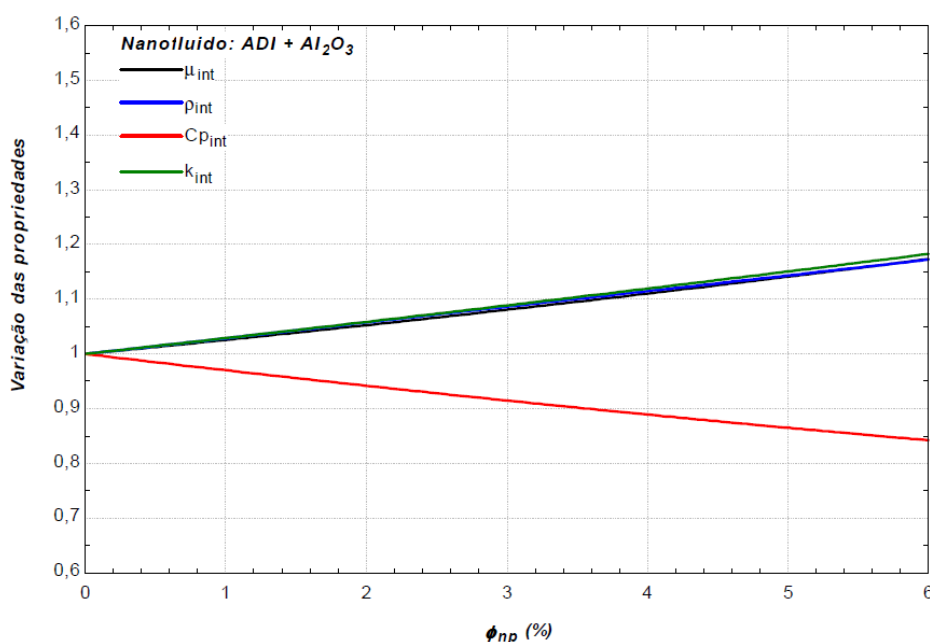


Figura 4.4 – Tendência das propriedades para o nanofluido F1N4, variando com a concentração volumétrica.

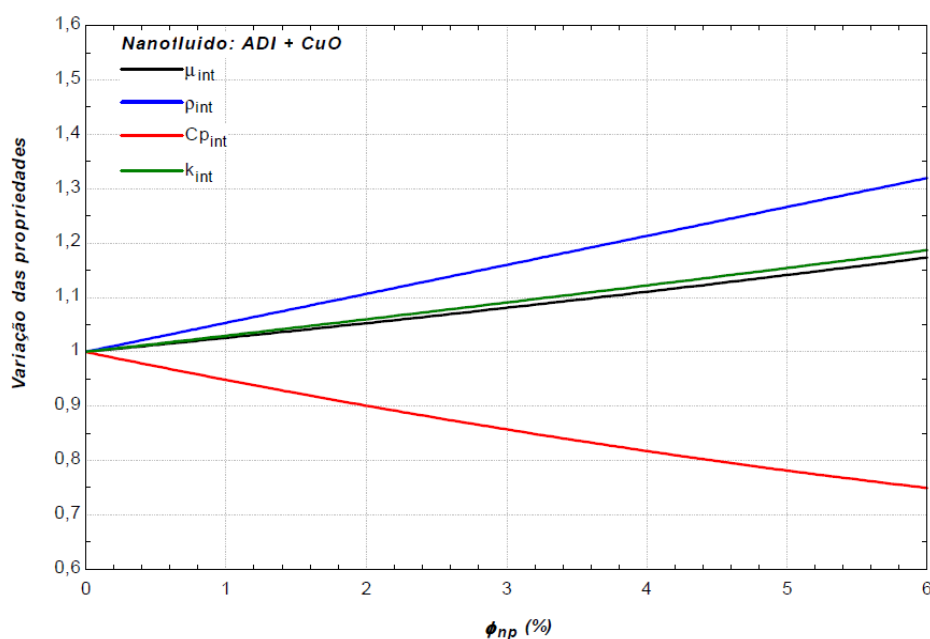


Figura 4.5 – Tendência das propriedades para o nanofluido F1N5, variando com a concentração volumétrica.

É importante destacar o caso do nanofluido baseado em alumina e água, que mostra valores de intensificação de densidade, viscosidade e condutividade próximas na faixa de concentrações estudadas, o que não ocorre com nenhum dos outros nanofluidos estudados. A Fig. 4.6 destaca a interseção das linhas de tendência das intensificações para o nanofluido baseado em água com nanopartículas de alumina.

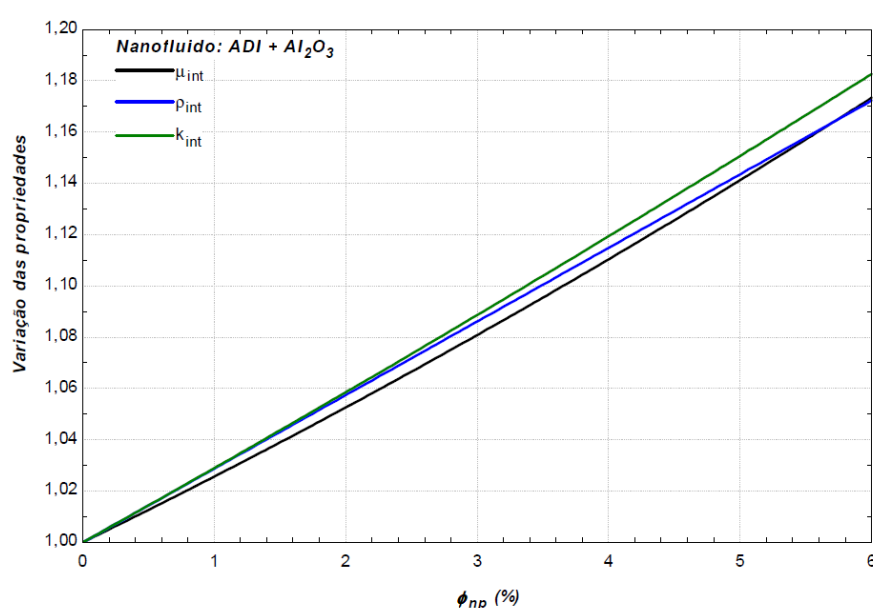


Figura 4.6 – Destaque da tendência das propriedades para o nanofluido F1N4 variando com a concentração volumétrica.

Tal interseção das linhas de tendência indica que para uma determinada concentração volumétrica, as intensificações da viscosidade e da densidade possuem igual valor. Este fenômeno tem um efeito direto sobre o cálculo da velocidade de entrada como condição imposta na simulação, que será discutido com maior detalhe na seção 4.3.1.

As Figs. 4.7, 4.8, e 4.9 mostram as tendências da variação das propriedades para nanofluidos de etileno glicol com nanopartículas de ferro, alumina e óxido de cobre, respectivamente. As tendências são semelhantes aos casos dos nanofluidos que utilizam nanopartículas metálicas, com exceção da intensificação da massa específica do nanofluido com nanopartículas dispersas de alumina. Esta intensificação é menor do que a intensificação da viscosidade do nanofluido. Este fenômeno, e sua consequência sobre a velocidade de entrada a calcular, também serão discutidos com maior detalhe na seção 4.3.1.

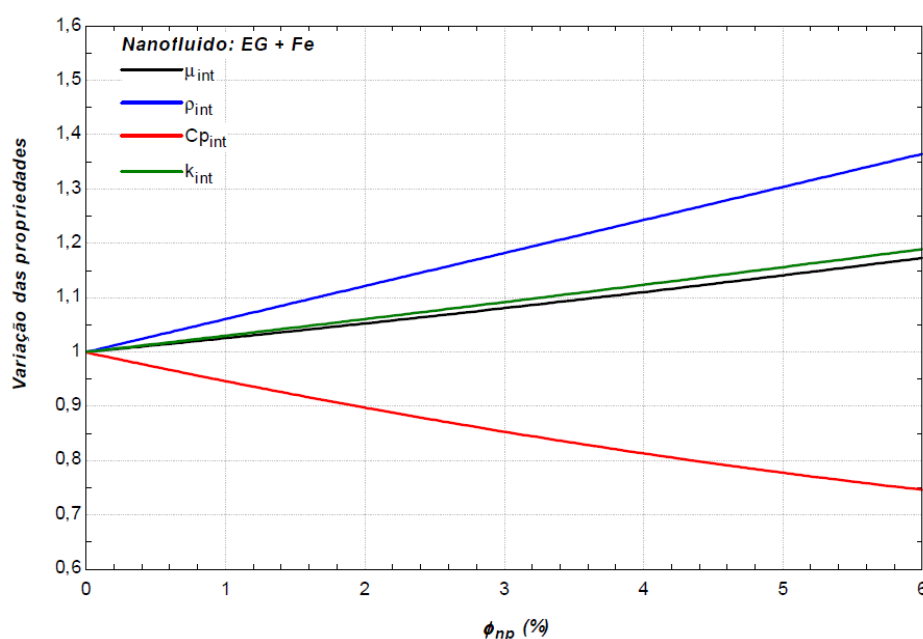


Figura 4.7 – Tendência das propriedades para o nanofluido F2N3, variando com a concentração volumétrica.

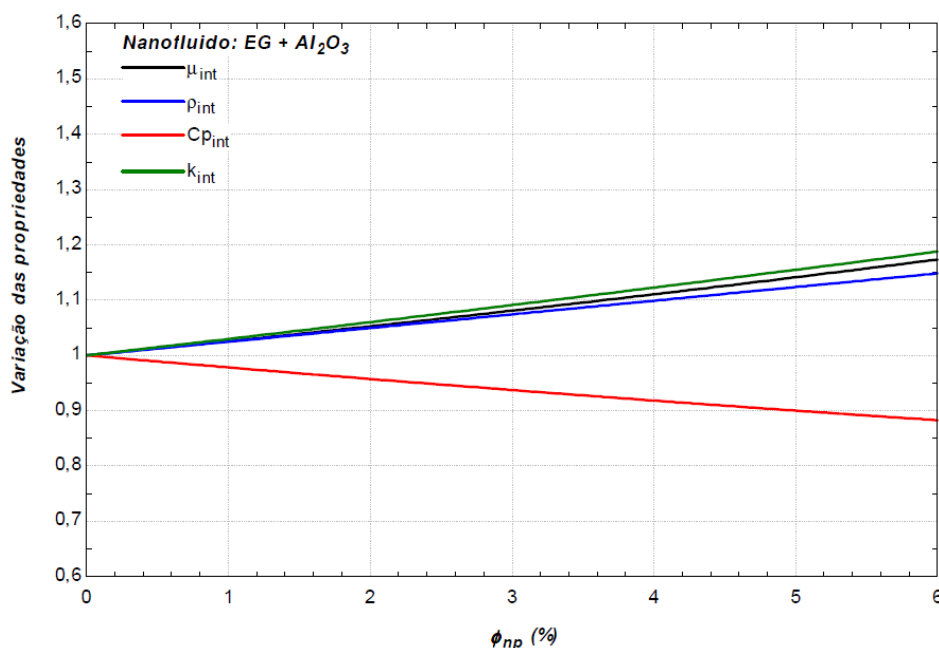


Figura 4.8 - Tendência das propriedades para o nanofluido F2N4, variando com a concentração volumétrica.

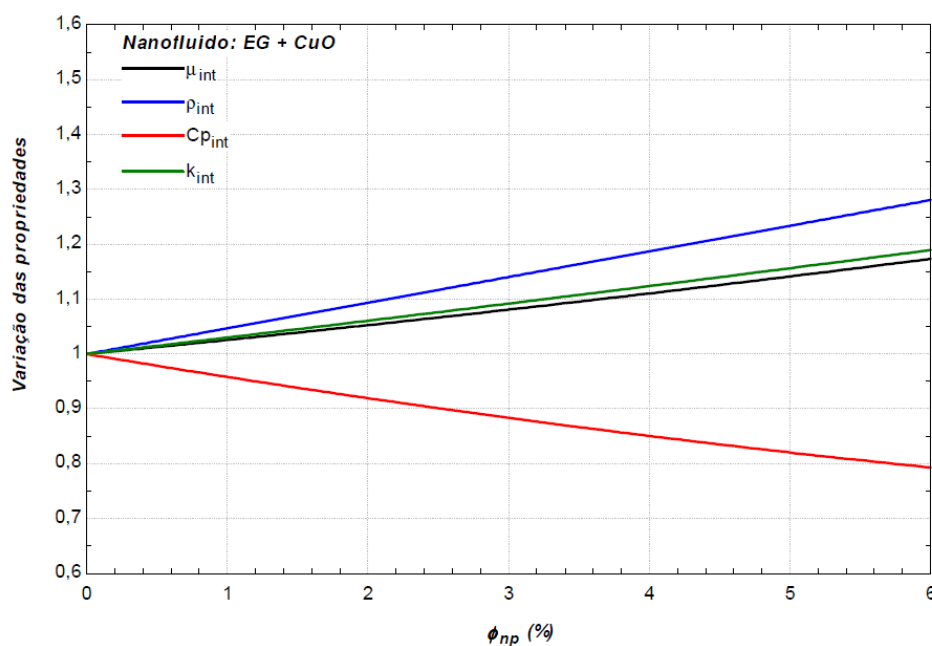


Figura 4.9 - Tendência das propriedades para o nanofluido F2N5, variando com a concentração volumétrica.

As Figs. 4.10, 4.11 e 4.12 mostram as tendências da variação das propriedades para nanofluidos de poli-alfa-olefin com nanopartículas de ferro, alumina e óxido de cobre, respectivamente. Nestes casos, as tendências de variação das propriedades são semelhantes às dos nanofluidos de água com nanopartículas metálicas dispersas.

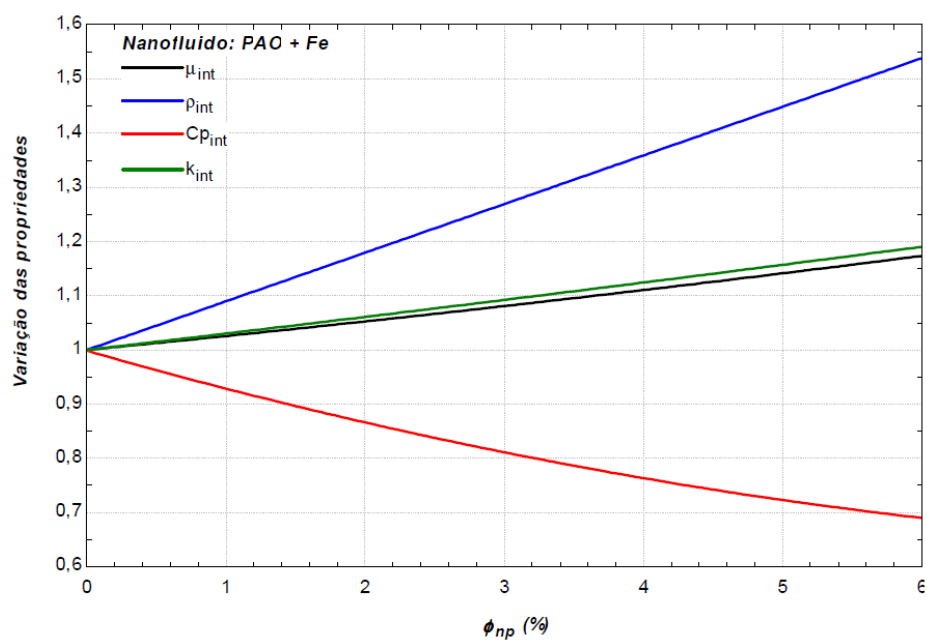


Figura 4.10 - Tendência das propriedades para o nanofluido F3N3, variando com a concentração volumétrica.

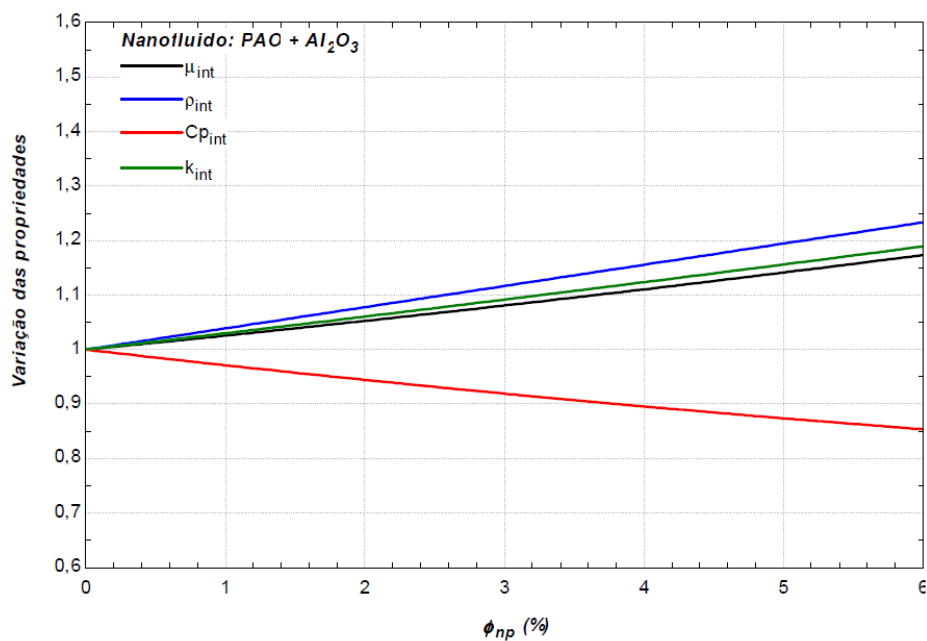


Figura 4.11 - Tendência das propriedades para o nanofluido F3N4, variando com a concentração volumétrica.

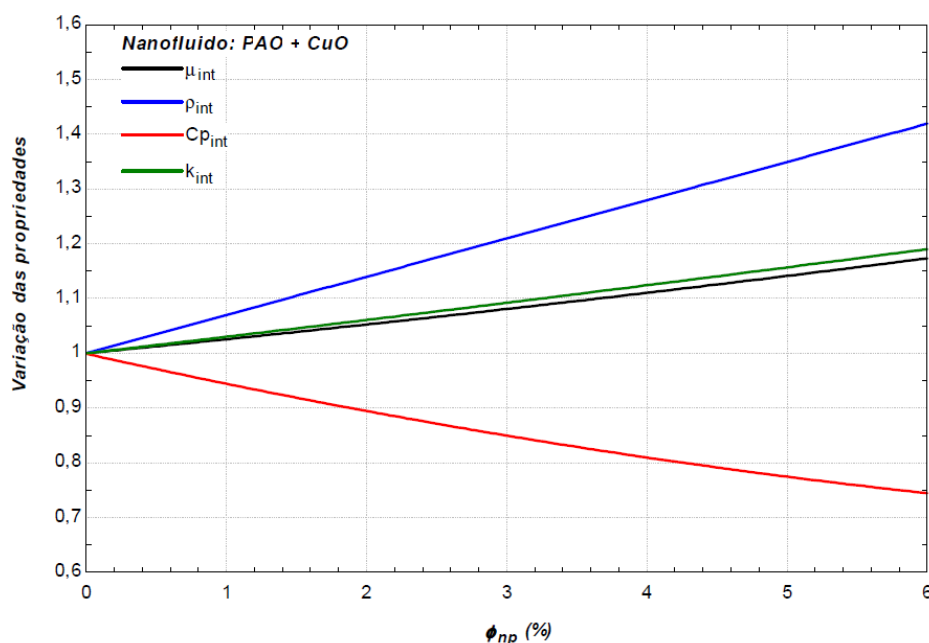


Figura 4.12 - Tendência das propriedades para o nanofluido F3N5, variando com a concentração volumétrica.

4.2.1. Variação do número de Prandtl

Outra das formas para visualizar o efeito da adição de nanopartículas nas propriedades do fluido base se dá por intermédio do número de Prandtl, Pr . Pela sua forma, este é geralmente mostrado como uma propriedade das substâncias em um determinado estado.

Além disso, o número de Prandtl relaciona três de quatro das propriedades modificadas dos nanofluidos. Neste caso, a variação do Pr permite dar uma idéia de qual nanofluido terá melhor comportamento térmico em relação com o fluido base, pois relaciona a difusividade de momento e difusividade térmica desenvolvidas no escoamento. A Fig. 4.13 mostra como varia o número de Prandtl para todos os nanofluidos estudados, baseados no cálculo das propriedades modificadas (ver Tab. 3.7).

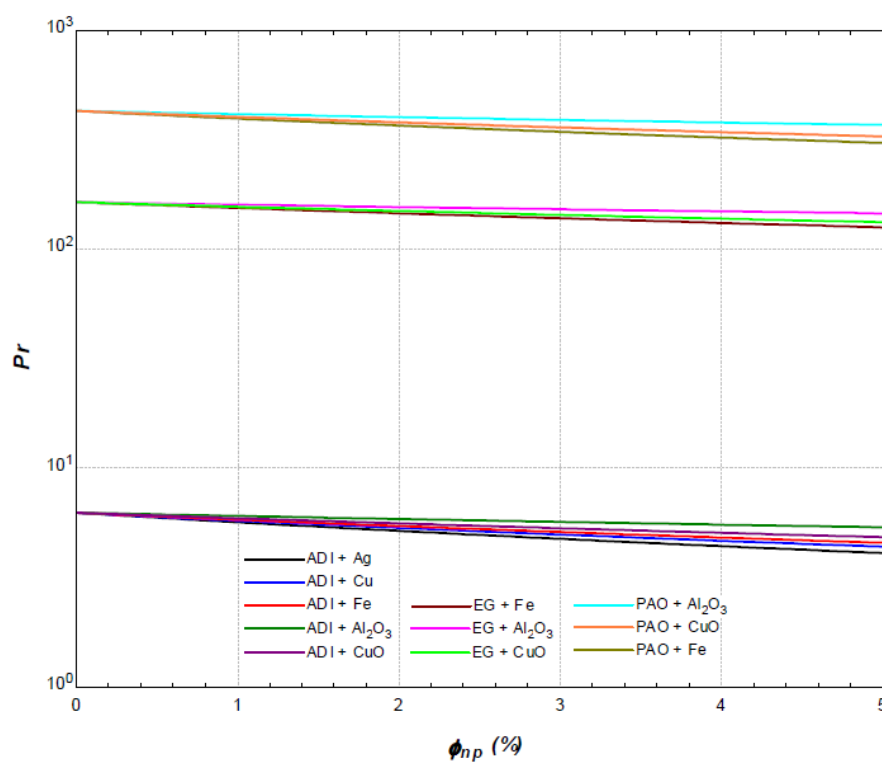


Figura 4.13 – Variação do Pr para todos os nanofluidos, variando com a concentração volumétrica.

As Figs. 4.14, 4.15 e 4.16 mostram as tendências do número de Prandtl para os nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-olefin, respectivamente.

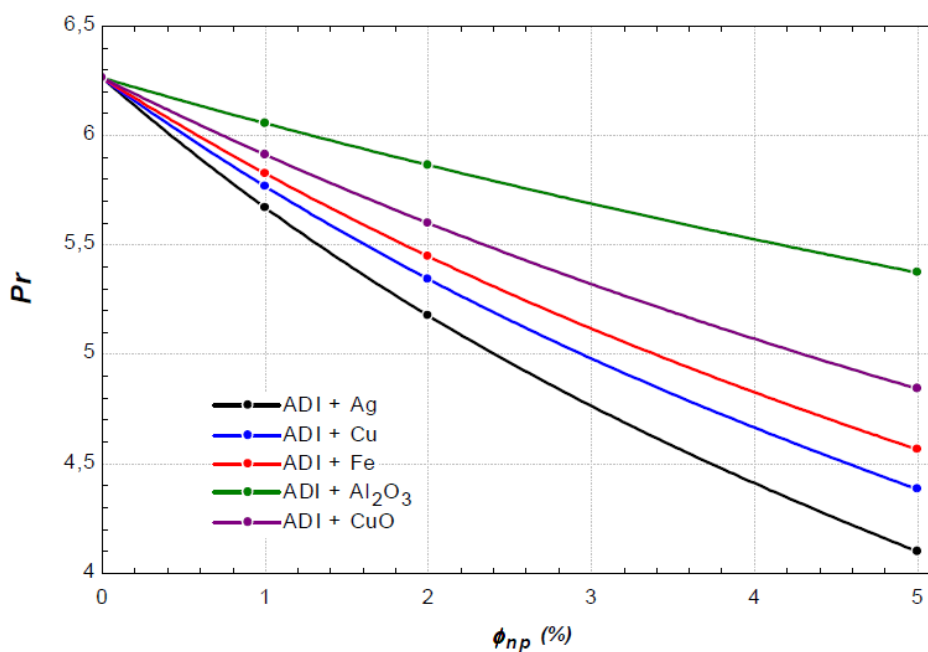


Figura 4.14 - Variação do Pr dos nanofluidos baseados em água, variando com a concentração volumétrica.

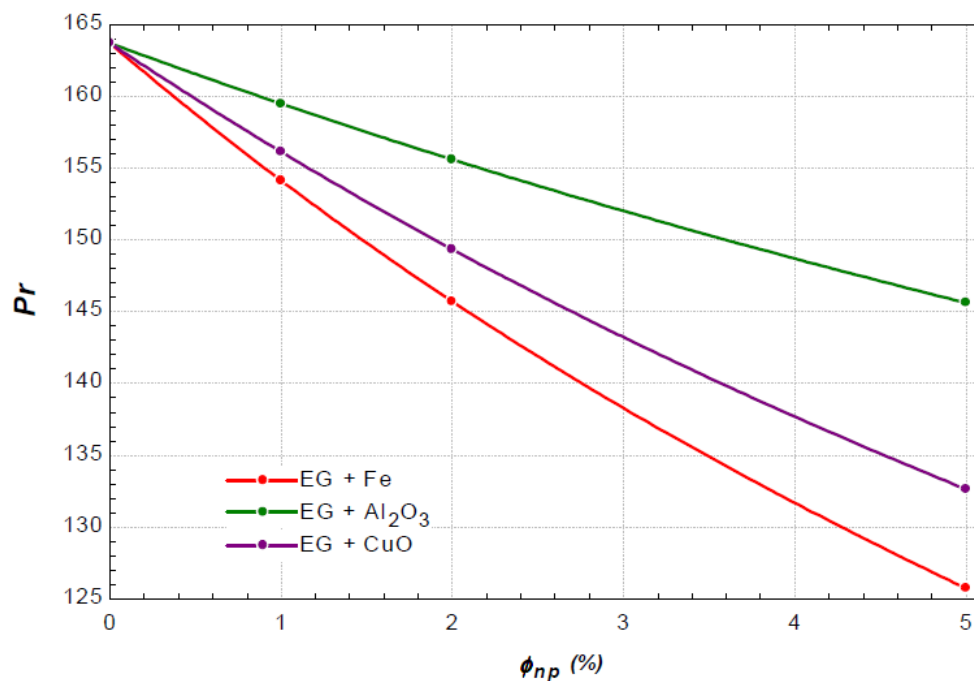


Figura 4.15 - Variação do Pr dos nanofluidos baseados em etileno glicol, variando com a concentração volumétrica.

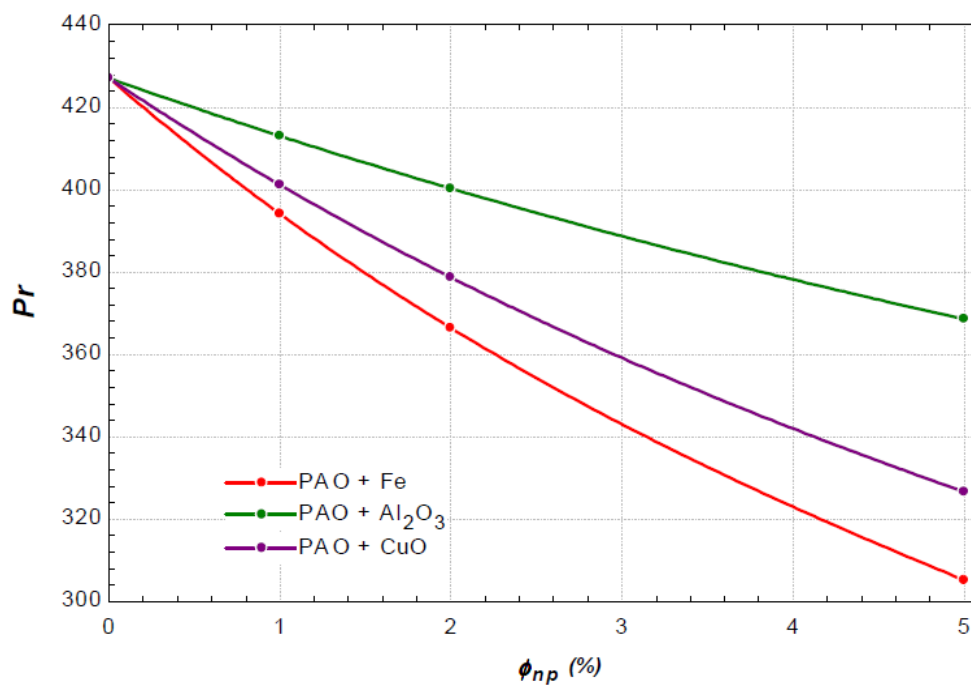


Figura 4.16 - Variação do Pr dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin, variando com a concentração volumétrica.

Dado que o número de Prandtl relaciona os efeitos de difusão de momento e térmica (conforme ilustrado na Eq. 2.41), é conveniente que este seja cada vez menor, pois indicaria que a o aumento da viscosidade é superado pelo efeito combinado da diminuição do calor específico e a intensificação da condutividade térmica.

Deste modo, tem-se a previsão inicial que os nanofluidos compostos por nanopartículas de prata terão o melhor comportamento térmico entre todos os estudados, seguido pelos baseados em cobre, ferro, óxido de cobre e alumina. No entanto, é importante lembrar que a densidade foi desconsiderada nesta análise preliminar.

Outro dos efeitos esperados das variações no Prandtl é a diminuição do comprimento de entrada térmica em regime laminar, conforme detalhado na seção 2.6.4. Segundo a Eq. (2.50), o comprimento de entrada térmica é função do diâmetro da tubulação, o número de Reynolds e o número de Prandtl. Sendo que tanto o diâmetro e o Re são valores constantes definidos para cada simulação, o comprimento de entrada térmica é função somente do número de Prandtl. Desse modo, e conforme as Figs. 4.14 a 4.16, é esperado que o desenvolvimento térmico ocorra primeiro para os nanofluidos com nanopartículas de prata, seguido por aqueles que contêm nanopartículas de cobre, ferro, óxido de cobre e alumina, nessa ordem.

4.3. Desenvolvimento do escoamento de nanofluido

Das simulações realizadas, foram obtidos os campos de velocidade, temperatura e pressão no domínio da tubulação estudada para cada caso. Quando comparados, estes resultados mostram a variação nos comportamentos hidrodinâmico e térmico do escoamento, os quais são objeto de estudo neste trabalho.

4.3.1. Comportamento Hidrodinâmico

O comportamento hidrodinâmico do escoamento do nanofluido é descrito pelo perfil de velocidade na região totalmente desenvolvida. Neste trabalho, os perfis de velocidade foram utilizados basicamente para validar o aspecto difusivo do fenômeno, porém foi encontrado um comportamento interessante para o caso dos nanofluidos que utilizam nanopartículas de alumina. Estes comportamentos serão comentados a seguir.

Os perfis de velocidade para os nanofluidos F1N1, F1N2, F1N3 e F1N5 em regime laminar mostraram um comportamento semelhante. Tal comportamento é ilustrado na Fig.

4.17, que é o caso do nanofluido de nanopartículas de prata dispersas em água (F1N1) escoando para um valor de $Re=250$.

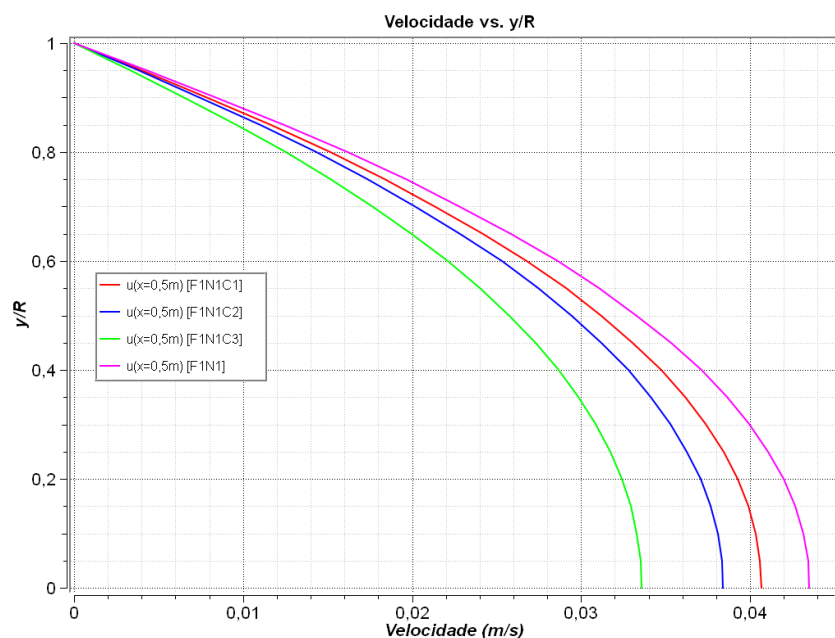


Figura 4.17 – Perfil de velocidade para o nanofluido F1N1 ($Re=250$).

Sob a mesma condição ($Re=250$), o nanofluido composto por nanopartículas de alumina dispersas em água (F1N4) mostra o comportamento ilustrado na Fig. 4.18.

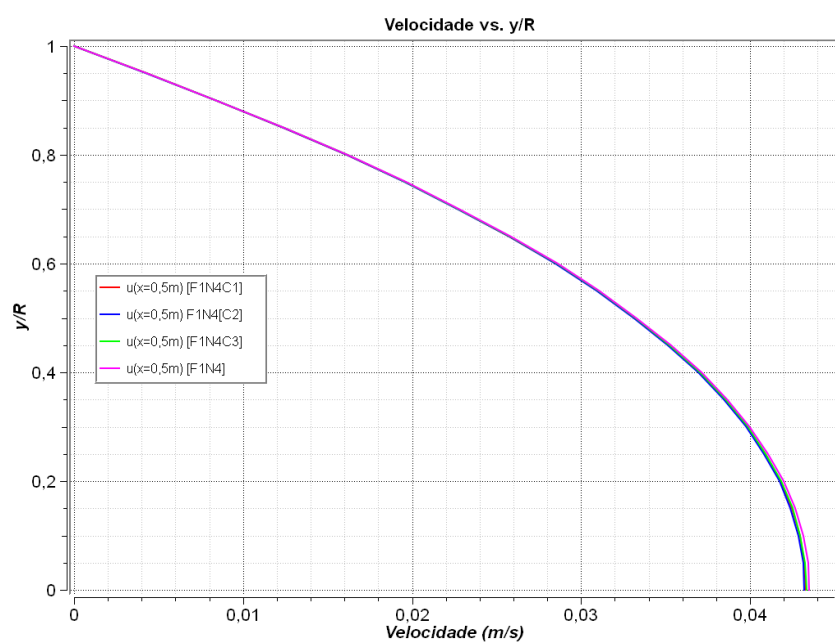


Figura 4.18 – Perfil de velocidade para o nanofluido F1N4 ($Re=250$).

Comportamentos similares foram evidenciados para os demais fluidos base. Desse modo, para os nanofluidos baseados em etileno glicol, os perfis de velocidade em regime laminar dos nanofluidos que contêm nanopartículas de ferro (F2N3) e óxido de cobre (F2N5) mostraram uma tendência semelhante. Este comportamento pode ser observado na Fig. 4.19, que é o caso do nanofluido F2N3 com $Re=100$.

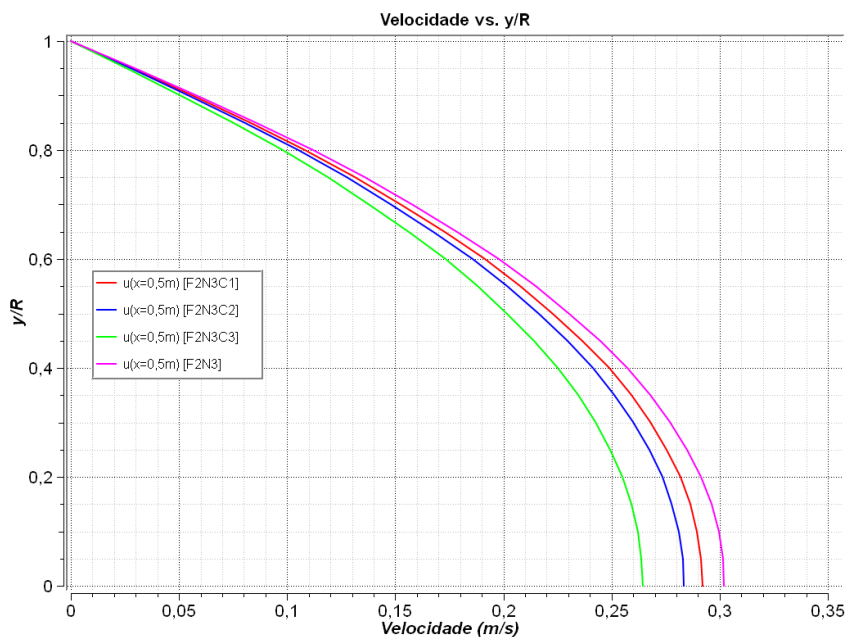


Figura 4.19 – Perfil de velocidade para o nanofluido F2N3 ($Re=100$).

O caso do nanofluido F2N4 sob a mesma condição dinâmica ($Re=100$) é ilustrado na Fig. 4.20.

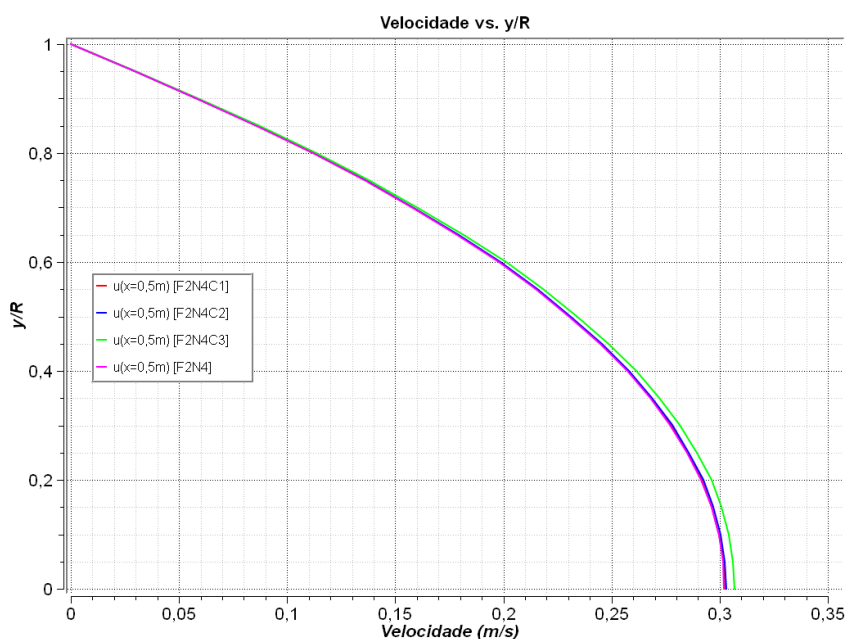


Figura 4.20 – Perfil de velocidade para o nanofluido F2N4 ($Re=100$).

Para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin, aqueles que contêm nanopartículas de ferro (F3N3) e óxido de cobre (F3N5) apresentaram um perfil de velocidade com a mesma tendência em regime laminar, que é ilustrado para o caso de $Re=100$ na Fig. 4.21 e na Fig. 4.22, respectivamente.

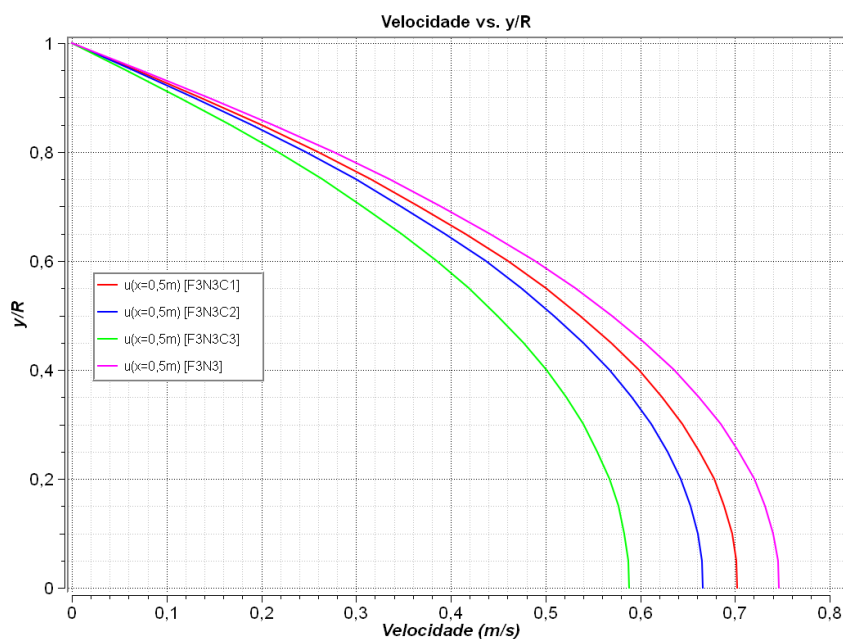


Figura 4.21 - Perfil de velocidade para o nanofluido F3N3 ($Re=100$).

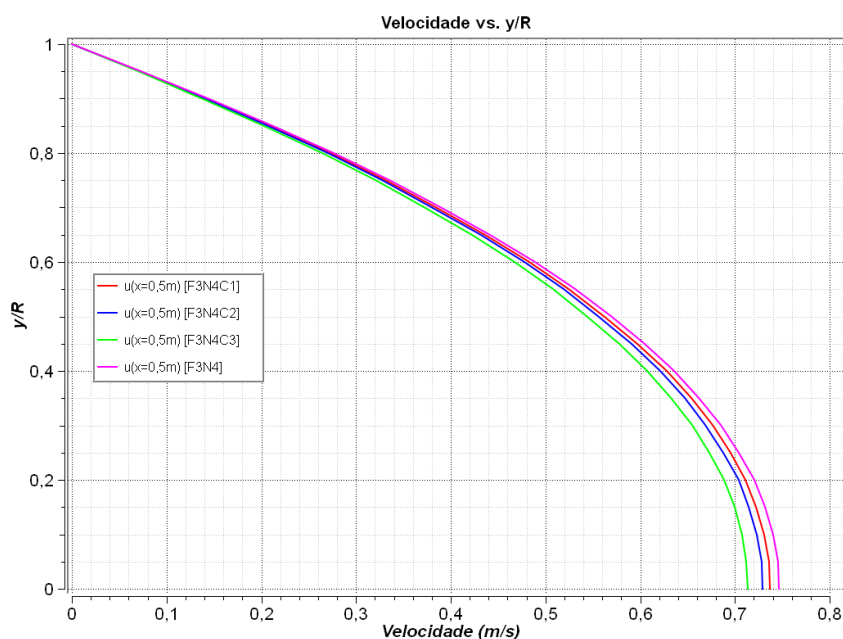


Figura 4.22 - Perfil de velocidade para o nanofluido F3N4 ($Re=100$).

Como esperado, também variam os perfis de velocidade em regime turbulento. Novamente, todos os nanofluidos seguiram a mesma tendência de variação da velocidade, a exceção daqueles que contêm nanopartículas de alumina dispersas em água (F1N1).

A seguir, são mostrados os perfis de velocidade do escoamento sob a condição de $Re = 10000$ para os nanofluidos baseados em água (F1N1), para os nanofluidos baseados em etileno glicol (F2N3) e para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (F3N3) nas Figs. 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente.

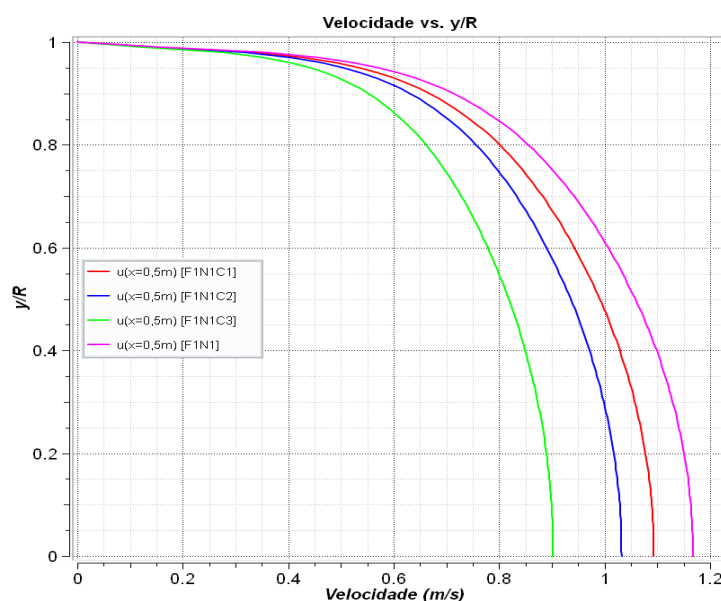


Figura 4.23 - Perfil de velocidade para o nanofluido F1N1 ($Re=10000$).

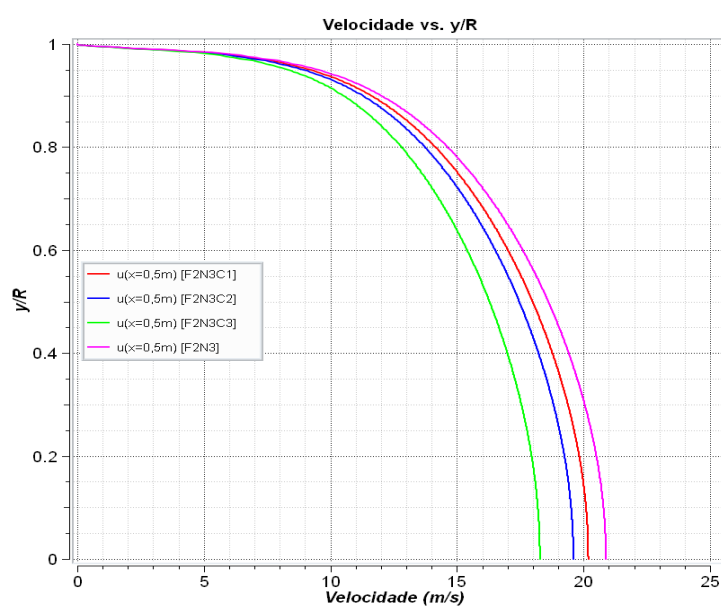


Figura 4.24 - Perfil de velocidade para o nanofluido F2N3 ($Re=10000$).

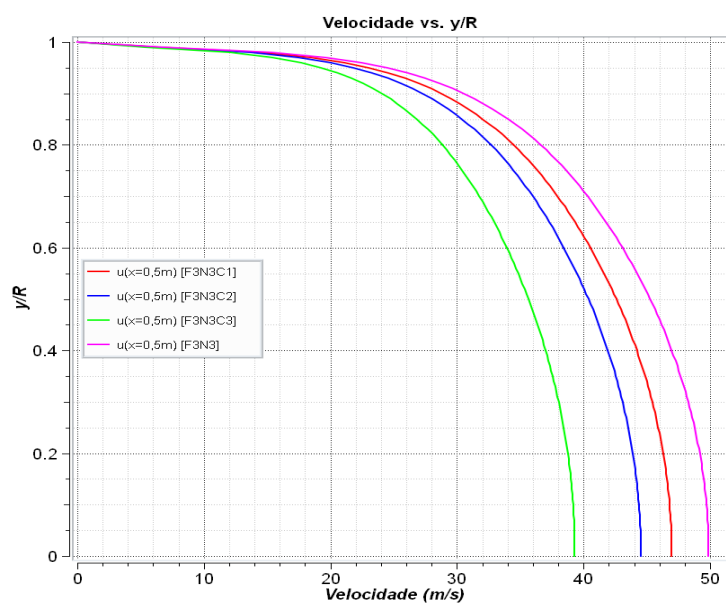


Figura 4.25 - Perfil de velocidade para o nanofluido F3N3 (Re=10000).

Os perfis de velocidade em regime turbulento para os casos dos nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina dispersas em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin são mostrados nas Figs. 4.26, 4.27 e 4.28, respectivamente.

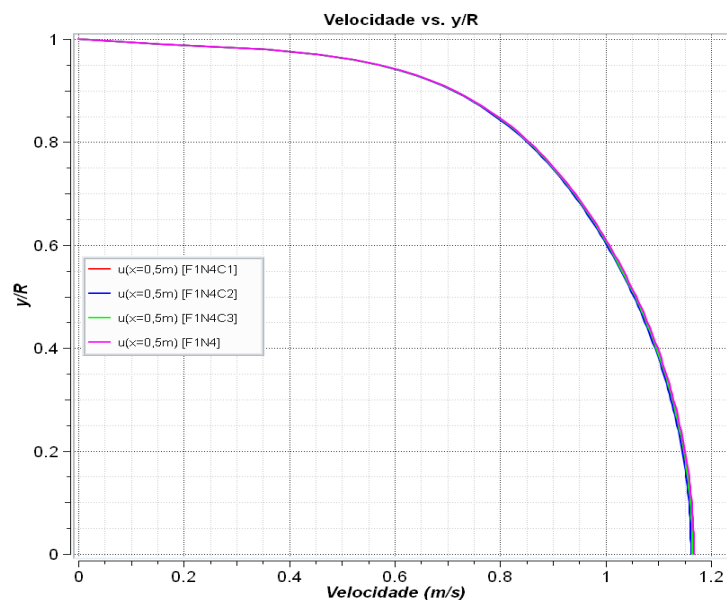


Figura 4.26 - Perfil de velocidade para o nanofluido F1N4 (Re=10000).

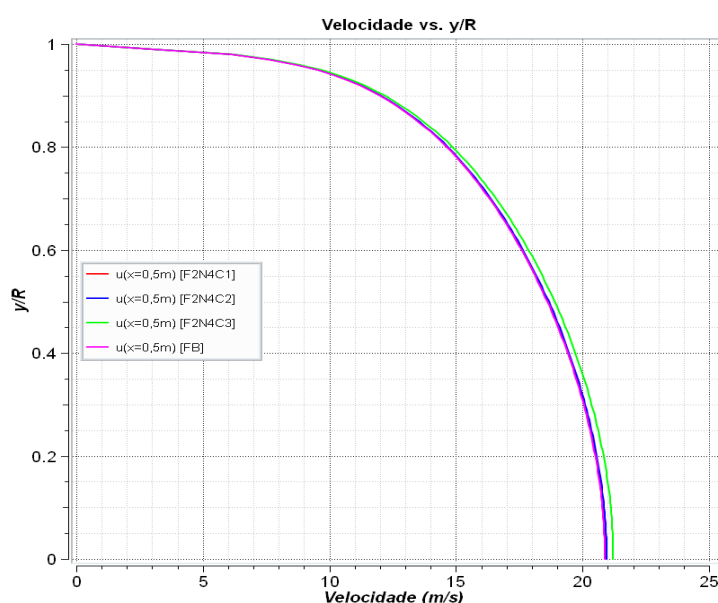


Figura 4.27 - Perfil de velocidade para o nanofluido F2N4 ($Re=10000$).

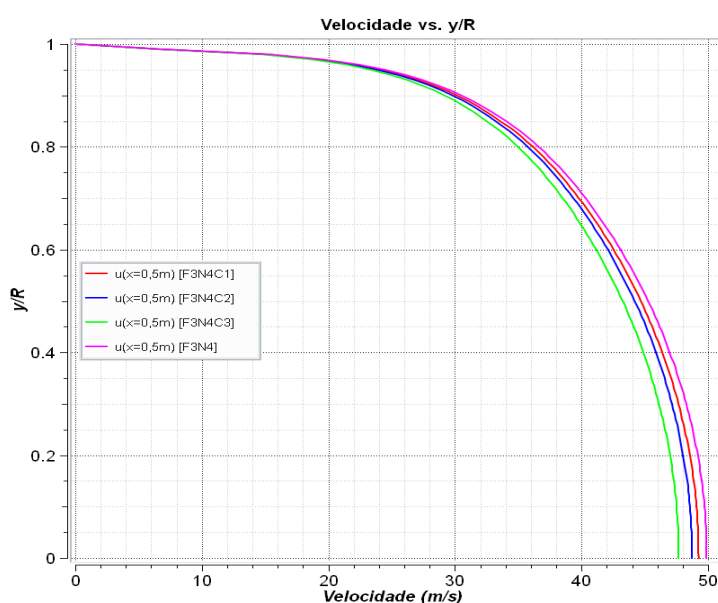


Figura 4.28 - Perfil de velocidade para o nanofluido F3N4 ($Re=10000$).

Nas figuras anteriores, observa-se uma pequena e irregular variação dos perfis de velocidade daqueles nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina dispersas em água (Figs. 4.18 e 4.26). Para os nanofluidos com nanopartículas de aluminas dispersas em etileno glicol, as velocidades calculadas tendem a aumentar para maiores concentrações volumétricas (Figs. 4.20 e 4.27). O contrário ocorre para os nanofluidos com nanopartículas dispersas em poli-alfa-oleofin (Figs. 4.25 e 4.28), cuja tendência é a mesma dos demais nanofluidos.

Como o número de Reynolds (Re) foi selecionado para definir as condições dinâmicas impostas ao escoamento, os valores deste estão definidos para todas as simulações desenvolvidas no presente trabalho em uma faixa estabelecida. Uma consequência imediata deste condicionamento é a variação da velocidade de entrada para a simulação de cada nanofluido, conforme ilustra a Eq. (4.5).

$$u_m = \frac{\mu Re_D}{\rho D} \quad (4.5)$$

Tanto o diâmetro (que é constante para todas as simulações) como o Re são valores pré-definidos. Portanto, a velocidade de entrada é função da razão entre a viscosidade e a densidade do nanofluido.

Conforme o ilustrado na Fig. 4.6, para o caso do nanofluido de água com nanopartículas de alumina, era esperada uma diminuição inicial da velocidade de entrada em relação com a velocidade definida para o fluido base. Posteriormente, era esperado observar um incremento devido à aproximação das intensificações da viscosidade e densidade.

Por outro lado, para o nanofluido de etileno glicol com nanopartículas de alumina, como a intensificação da densidade é menor do que a intensificação da viscosidade (Fig. 4.8), a velocidade tende a diminuir.

Estes comportamentos são apresentados na Tab. 4.1, que mostra as velocidades de entrada deste nanofluido calculadas a partir das propriedades modificadas dos nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina.

Tabela 4.1 – Velocidades de entrada para dois grupos de nanofluidos

Fluido Base/ Nanofluido	u_m (m/s)				
	$Re = 250$	$Re = 500$	$Re = 1000$	$Re = 10000$	$Re = 20000$
F1	0,02233	0,04465	0,08931	0,89310	1,78620
F1N4C1	0,02226	0,04452	0,08904	0,89044	1,78088
F1N4C2	0,02223	0,04445	0,08890	0,88903	1,77805
F1N4C3	0,02228	0,04456	0,08913	0,89129	1,78259
F2	0,15462	0,38654	0,77309	15,46174	30,92348
F2N4C1	0,15476	0,38690	0,77380	15,47594	30,95187
F2N4C2	0,15509	0,38772	0,77543	15,50862	31,01724
F2N4C3	0,15705	0,39263	0,78527	15,70538	31,41076
F3	0,38218	0,95545	1,91090	38,21801	76,43601
F3N4C1	0,37732	0,94329	1,88658	37,73155	75,46311
F3N4C2	0,37326	0,93316	1,86631	37,32629	74,65258
F3N4C3	0,36518	0,91296	1,82592	36,51838	73,03676

É importante ressaltar que este efeito é determinado pela forma das correlações utilizadas para o cálculo das propriedades dos nanofluidos. No entanto, seja qual for o modelo definido para cada propriedade, deve se levar em consideração este efeito para o condicionamento dos dados de entrada em futuras simulações.

4.3.2. Comportamento térmico

Uma medida do comportamento térmico do escoamento de nanofluido é observável no perfil de temperatura desenvolvido ao longo da tubulação. A seguir, serão mostrados os perfis de temperatura do escoamento sob a condição do número de Reynolds, $Re = 250$, e fluxo de calor, $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$, para nanofluidos baseados em água e $Re = 100$ e $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol e poli-alfa-olefin. Nas Figs. 4.29, 4.30 e 4.31 são mostrados os perfis de temperatura para os casos representativos dos nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-olefein, respectivamente.

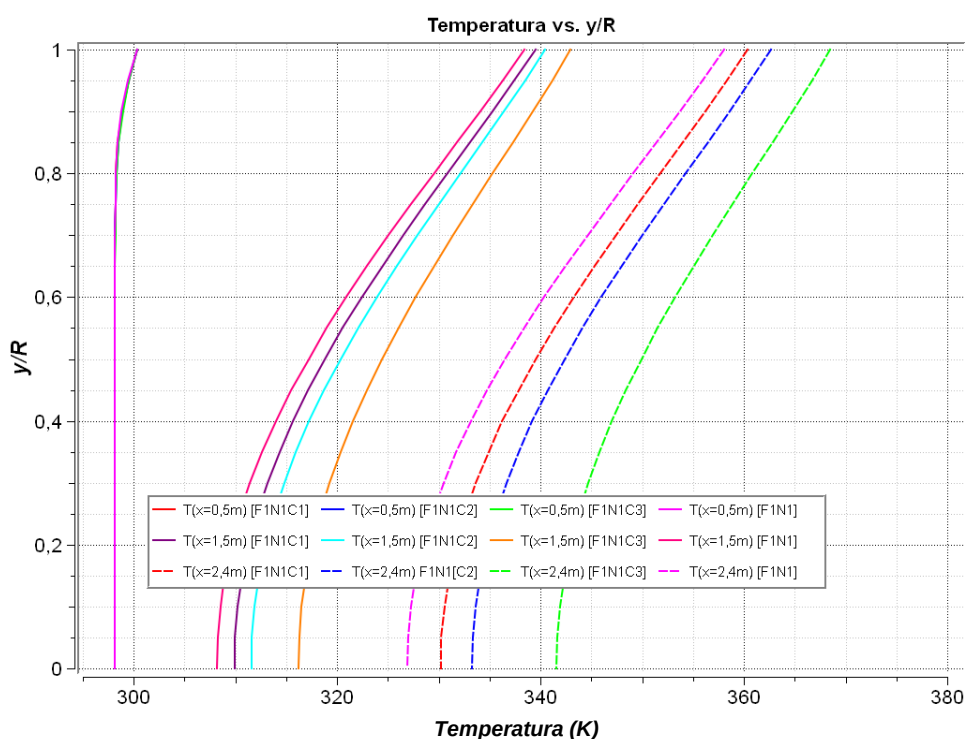


Figura 4.29 – Perfil de temperatura para o nanofluido F1N1 ($Re=250$).

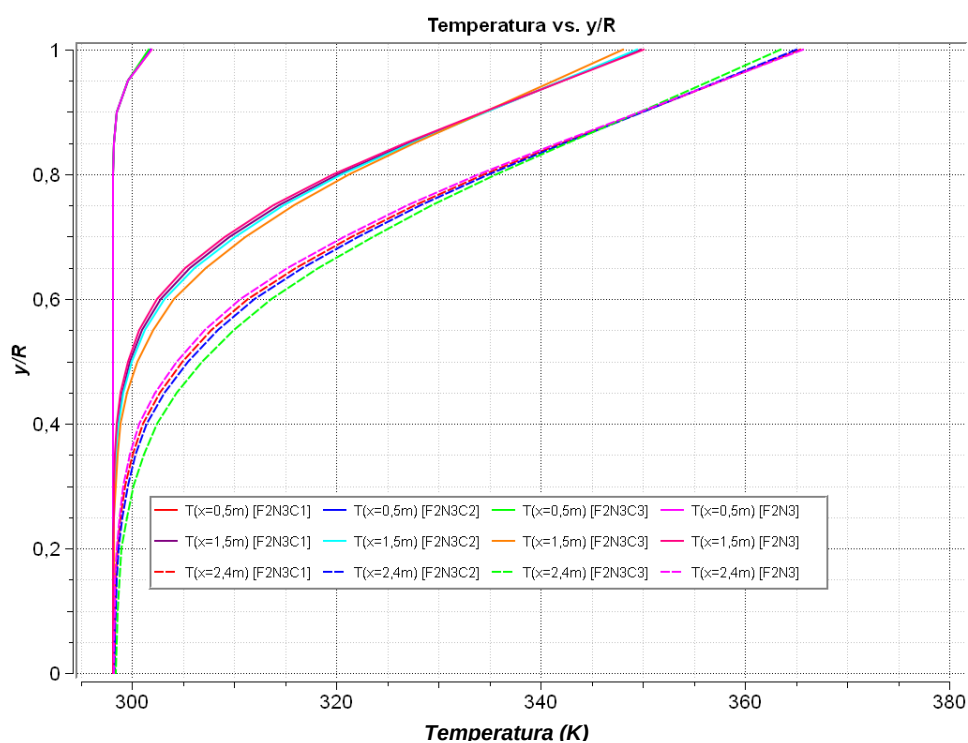


Figura 4.30 – Perfil de temperatura para o nanofluido F2N3 (Re=100).

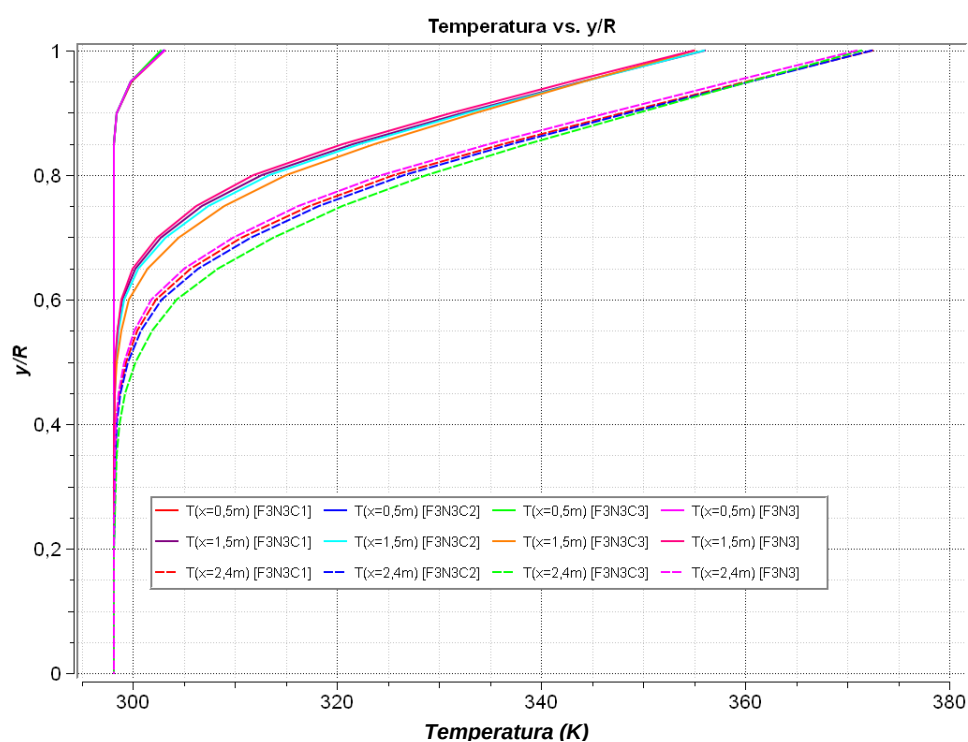


Figura 4.31 – Perfil de temperatura para o nanofluido F3N3 (Re=100).

Também no caso do comportamento térmico, foi observado que os resultados das simulações dos nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina resultaram diferentes. Assim, pode-se observar nas Figs. 4.32, 4.33 e 4.34 os perfis de temperatura dos

nanofluidos compostos de nanopartículas de alumina dispersas em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente (como nos casos anteriores, são mostrados apenas os casos representativos).

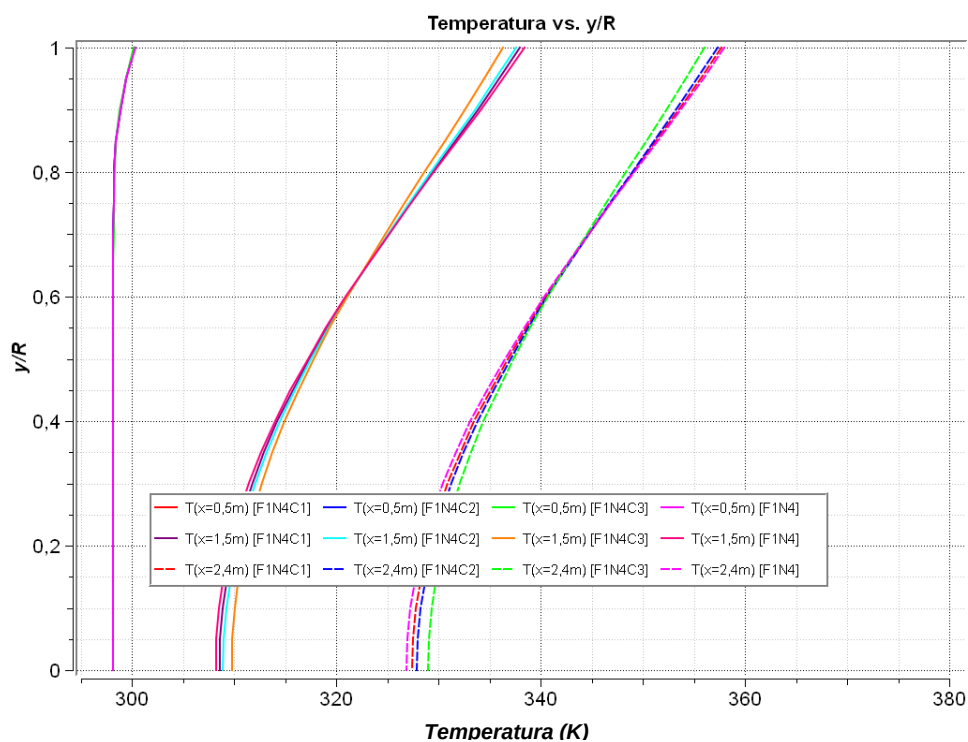


Figura 4.32 – Perfil de temperatura para o nanofluido F1N4 (Re=250).

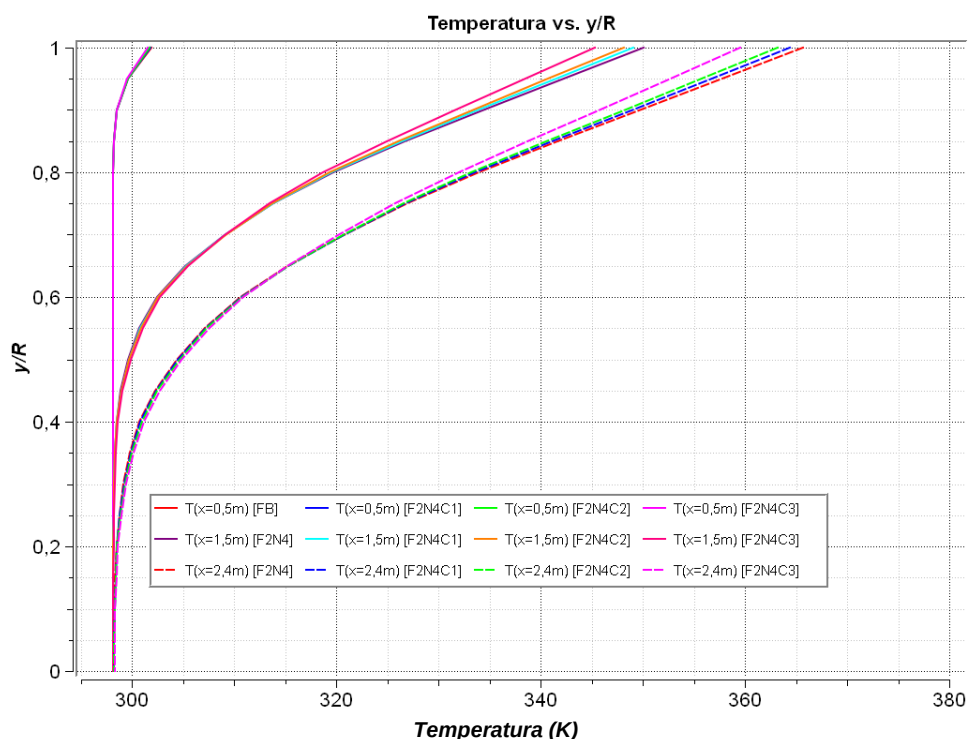


Figura 4.33 – Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 (Re=100).

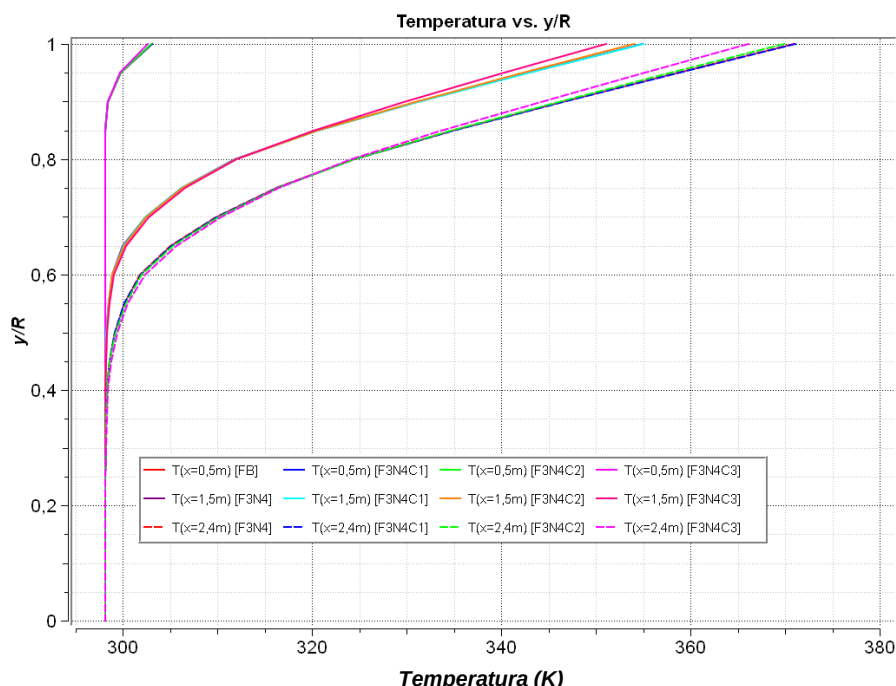


Figura 4.34 – Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 (Re=100).

Nas Figs. 4.32 a 4.34, pode-se visualizar que a adição de nanopartículas de alumina influencia de duas maneiras o comportamento térmico quando escoando em regime laminar. A primeira é através da variação irregular da velocidade de entrada, devido à variação das propriedades dos nanofluidos, conforme detalhado na subseção 4.3.1. A segunda é a alteração no comprimento de entrada para o completo desenvolvimento térmico. Este fenômeno torna-se mais evidente para o caso dos nanofluidos à base de água, como pode ser visto pela comparação das Figs. 4.29 e 4.32. Tal comportamento é consistente com a variação do número de Prandtl, conforme detalhado na subseção 4.2.1.

Em regime turbulento, o desenvolvimento térmico é atingido com maior rapidez, conforme o detalhado na subseção 2.6.3. A seguir, são mostrados os perfis de temperatura de nanofluidos escoando em regime turbulento, submetidos à condição de $Re = 10000$, com $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$ para os nanofluidos baseados em água e $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol e poli-alfa-olefin, nas Figs. 4.35, 4.36 e 4.37, respectivamente (apenas os casos representativos).

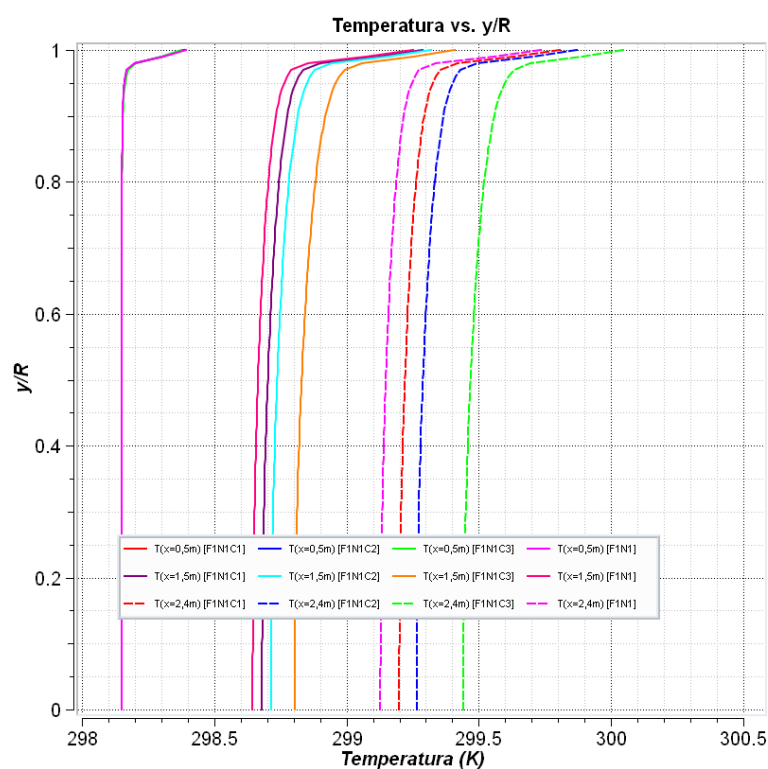


Figura 4.35 – Perfil de temperatura para o nanofluido F1N1 (Re=10000).

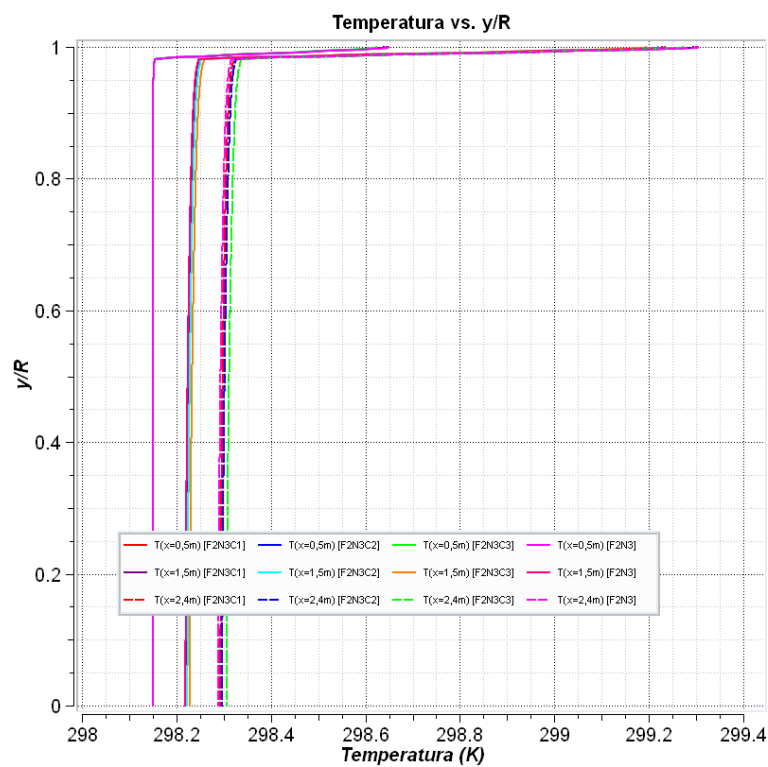


Figura 4.36 – Perfil de temperatura para o nanofluido F2N3 (Re=10000).

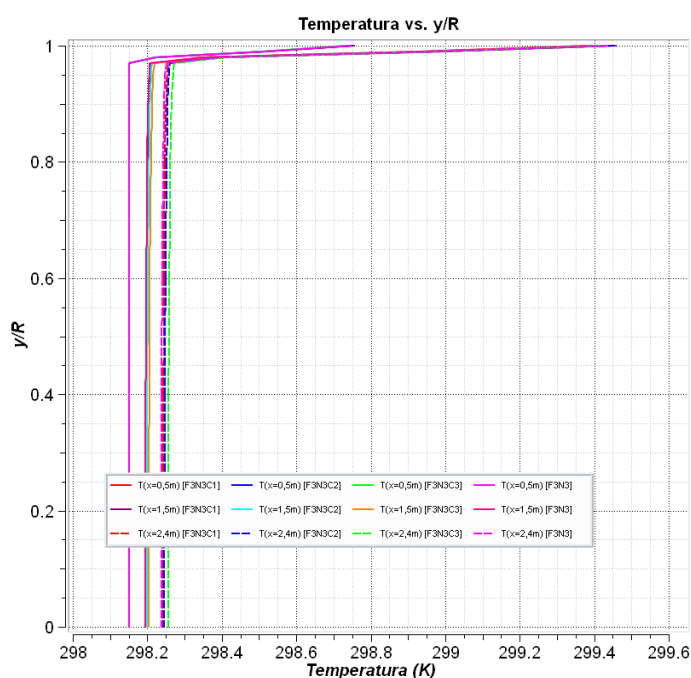


Figura 4.37 – Perfil de temperatura para o nanofluido F3N3 (Re=10000).

Também neste caso, os nanofluidos compostos por nanopartículas de alumina apresentam diferenças com os outros nanofluidos simulados. Estas pequenas diferenças são mostradas nas Figs. 4.38, 4.39 e 4.40 para nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente e apenas para os casos mais representativos.

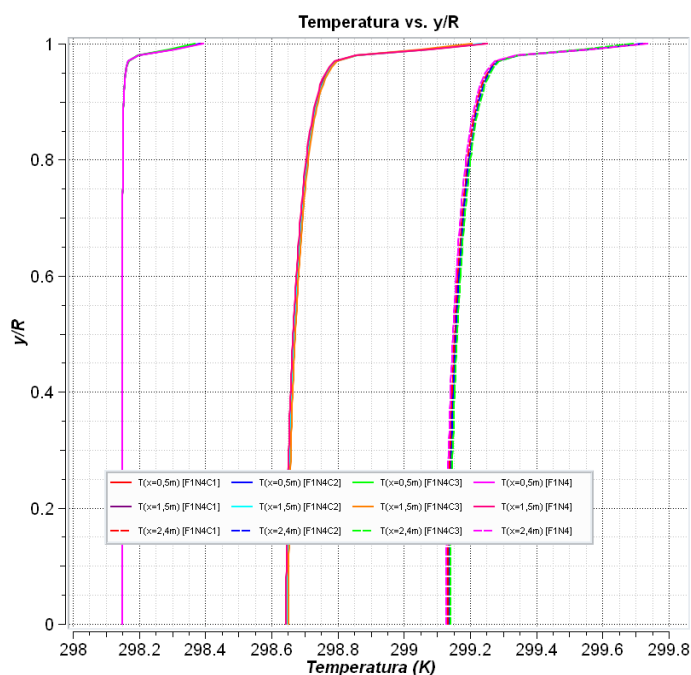


Figura 4.38 – Perfil de temperatura para o nanofluido F1N4 (Re=10000).

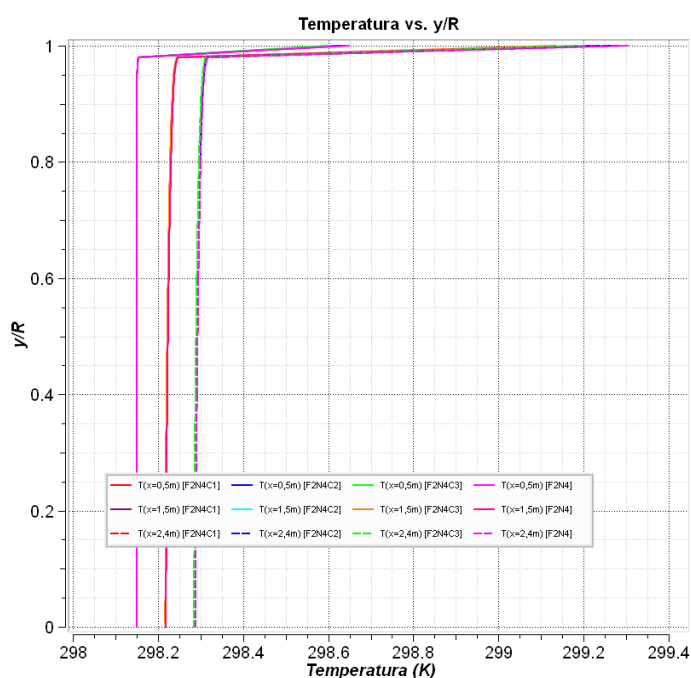


Figura 4.39 – Perfil de temperatura para o nanofluido F2N4 (Re=10000).

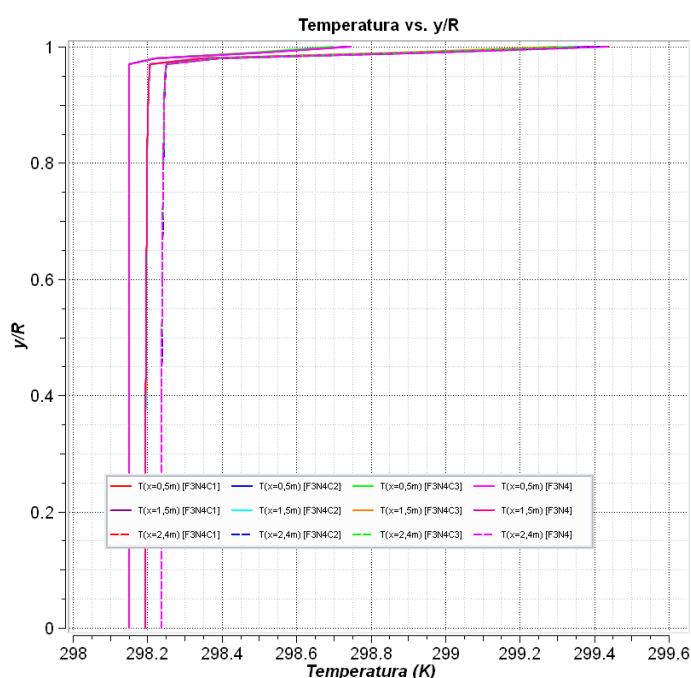


Figura 4.40 – Perfil de temperatura para o nanofluido F3N4 (Re=10000).

As Figs. 4.35 a 4.40 ilustram que o desenvolvimento térmico do escoamento ocorre apenas para os nanofluidos baseados em água (o que é confirmado na subseção a seguir). Isto é devido às propriedades do fluido base aplicado em cada caso, principalmente a notável diferença das suas viscosidades.

4.4. Intensificação da Transferência de calor

Mediante funções próprias do programa computacional foi possível coletar valores de temperatura média em seções determinadas da tubulação (descritas na seção 3.3.3), assim como a temperatura de parede nessas mesmas seções.

4.4.1. Temperaturas média e de parede

As tendências da variação tanto da temperatura de parede como da temperatura média do nanofluido são mostradas a seguir, apenas para visualizar os diversos tipos de comportamentos encontrados a partir das simulações, dado o grande número de resultados obtidos.

Na Fig. 4.41 mostra-se o desenvolvimento das temperaturas de parede e média para o nanofluido à base de água e nanopartículas de prata, sob as condições de $Re = 250$ e $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$.

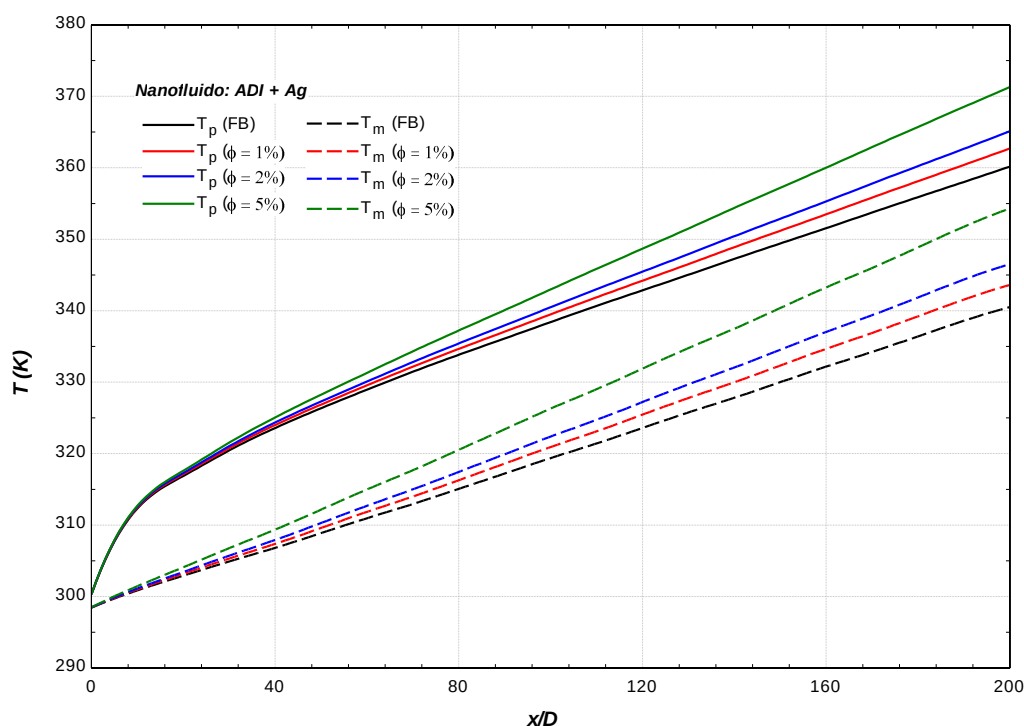


Figura 4.41 – Temperaturas média (T_m) e de parede (T_s) ao longo da tubulação para o nanofluido F1N1.

Na Fig. 4.42 mostra-se o desenvolvimento das temperaturas de parede e média para o nanofluido de etileno glicol e nanopartículas de ferro, sob as condições de $Re = 100$ e $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$.

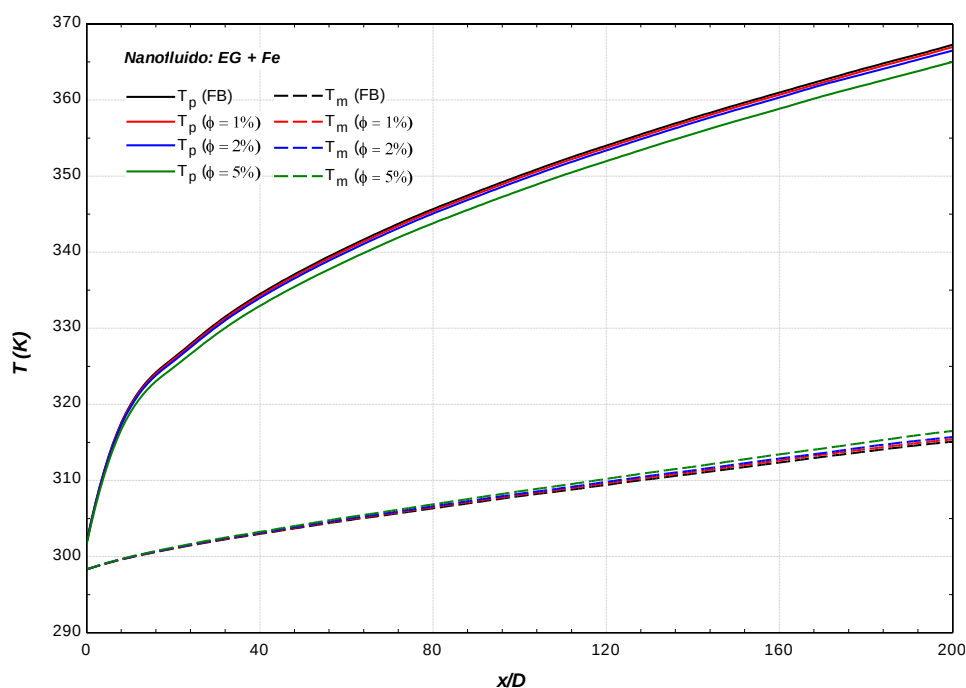


Figura 4.42 – Temperaturas média (T_m) e de parede (T_s) ao longo da tubulação, para o nanofluido F2N3.

Na Fig. 4.43 mostra-se o desenvolvimento das temperaturas de parede e média para o nanofluido a base de poli-alfa-olefin e nanopartículas de ferro, sob as condições de $Re = 100$ e $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$.

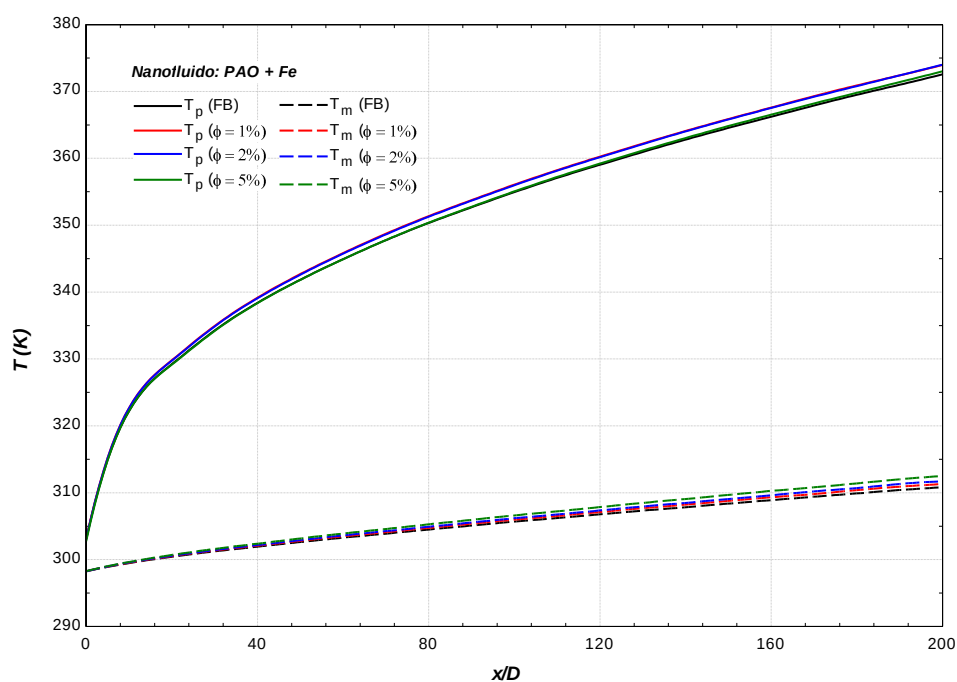


Figura 4.43 – Temperaturas média (T_m) e de parede (T_s) ao longo da tubulação para o nanofluido F3N3

Dos gráficos anteriores, torna-se evidente que o desenvolvimento térmico ainda não é alcançado para os casos dos nanofluidos baseados em etileno glicol e poli-alfa-olefin. A principal diferença deve-se aos altos números de Pr destes fluidos base, que deriva em um maior comprimento de entrada térmica para os escoamentos em regime laminar (conforme explicado na subseção 4.2.1)

4.4.2. Coeficiente de transferência de calor

Como o principal objetivo é determinar a intensificação do coeficiente da transferência de calor no escoamento do nanofluido, serão processados os resultados do campo de temperaturas mediante as equações dadas na subseção 2.6.5 para a condição de fluxo de calor constante. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), será empregada a correlação de resfriamento de Newton, da forma dada pela Eq. (4.6).

$$h_x = \frac{\dot{q}_s}{[T_{p(x)} - T_{m(x)}]} \quad (4.6)$$

Com base nesta definição e com os dados de temperaturas obtidas mediante simulação numérica, foram calculados os valores do coeficiente de transferência de calor convectivo ao longo da tubulação. A partir destes são calculados os valores médios do coeficiente de transferência de calor para cada nanofluido e sob as condições dinâmicas determinadas. Os resultados serão agrupados por fluido base e apresentados nas figuras a seguir, apenas para ilustrar as tendências gerais dos comportamentos para cada grupo de nanofluidos. Tais comportamentos serão detalhados mais adiante.

Nesse sentido, a Fig. 4.44 mostra o incremento do coeficiente de transferência de calor por convecção com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas dos nanofluidos baseados em água e o aumento do valor do número de Reynolds, tanto em regime laminar como turbulento.

A Fig. 4.45 ilustra a mesma tendência de aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção com a concentração volumétrica para os nanofluidos baseados em etileno glicol e com o incremento do Re em ambos os regimes, laminar e turbulento.

A fig. 4.46 mostra uma tendência geral similar às anteriores em relação com o incremento de ambos a concentração volumétrica e o Re . No entanto, se destaca a diminuição do valor de h para os nanofluidos de menor concentração volumétrica.

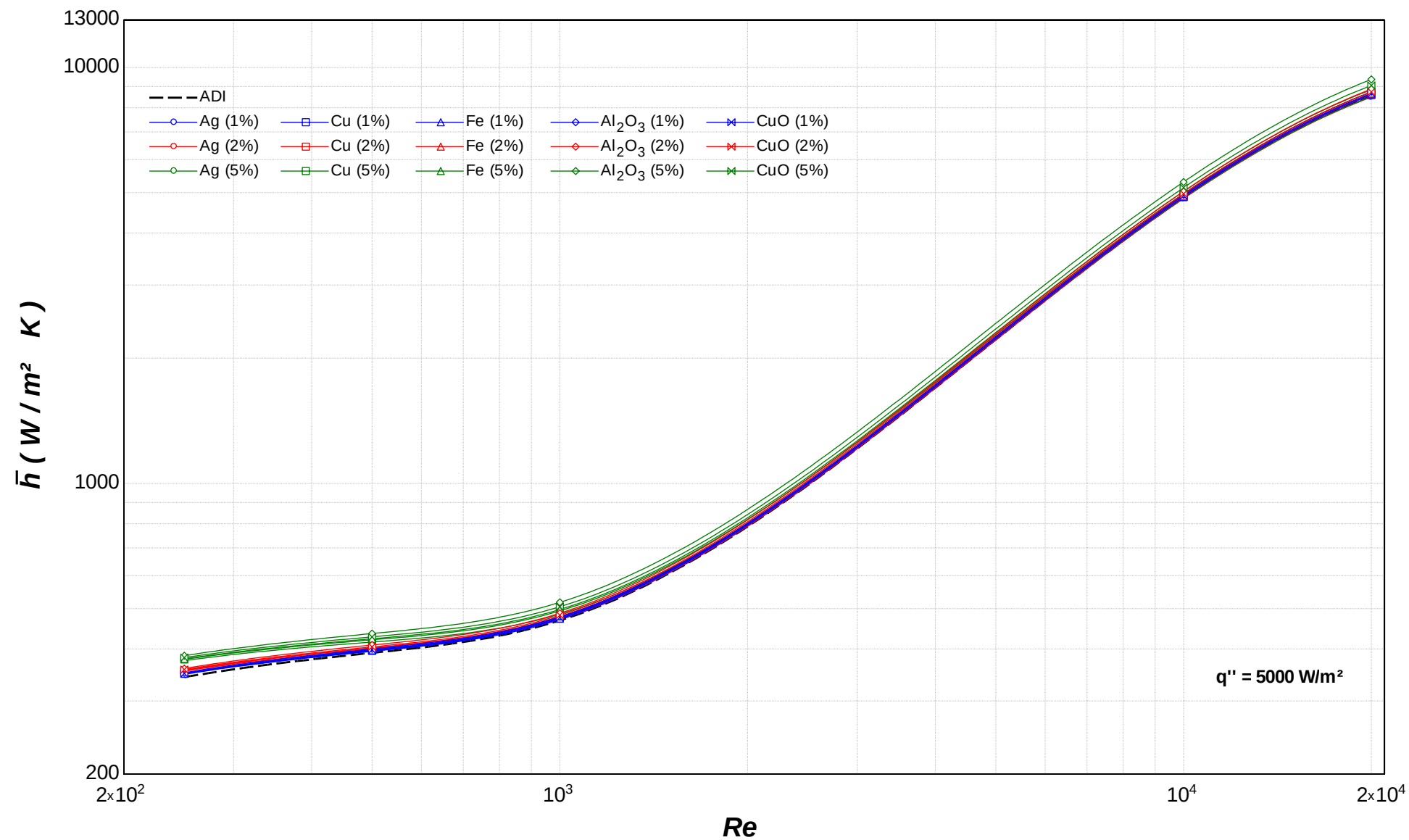


Figura 4.44 – Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em água.

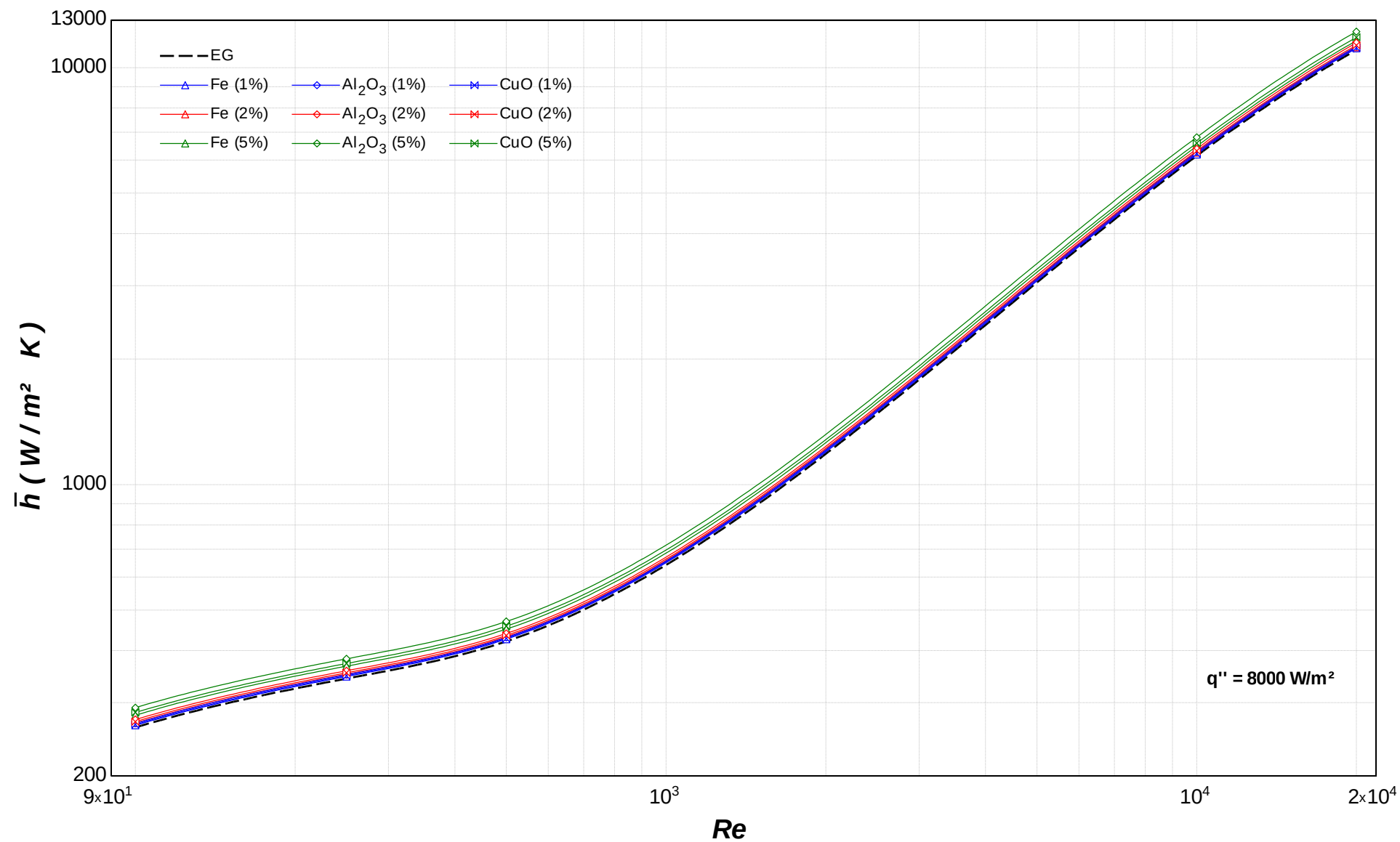


Figura 4.45 – Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em etileno glicol.

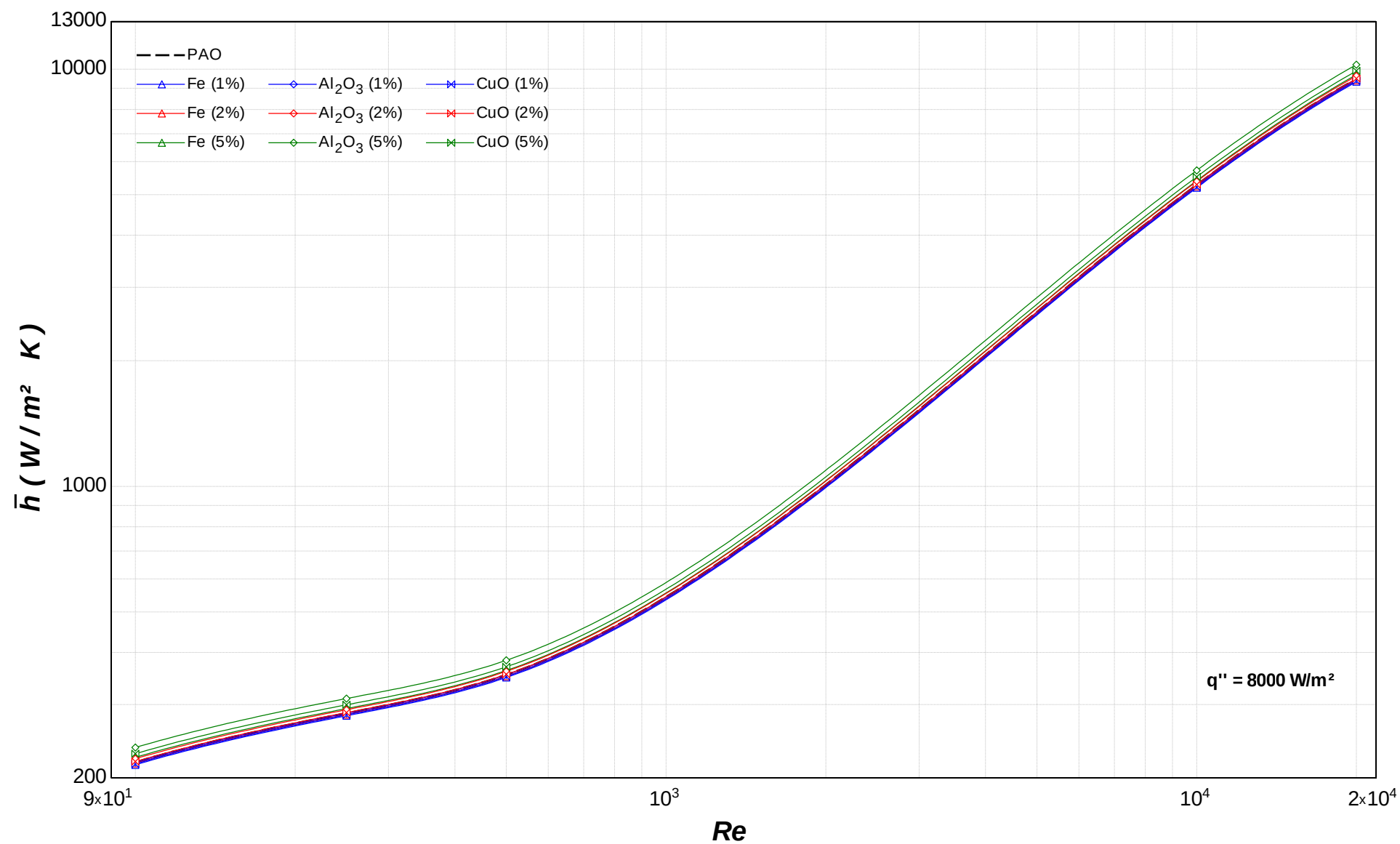


Figura 4.46 – Coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin.

Agrupados por tipo de regime, é possível observar melhor as tendências em cada caso. Desse modo, as Figs. 4.47, 4.48 e 4.49 mostram as intensificações do coeficiente de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-olefin, respectivamente, em regime laminar.

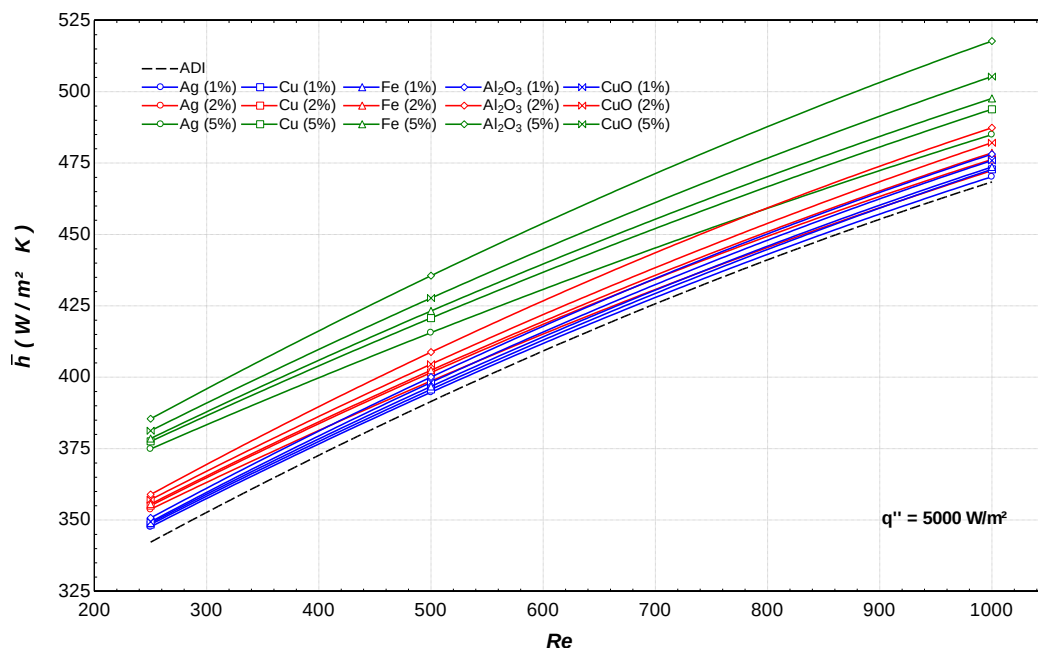


Figura 4.47 – Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em água para regime laminar.

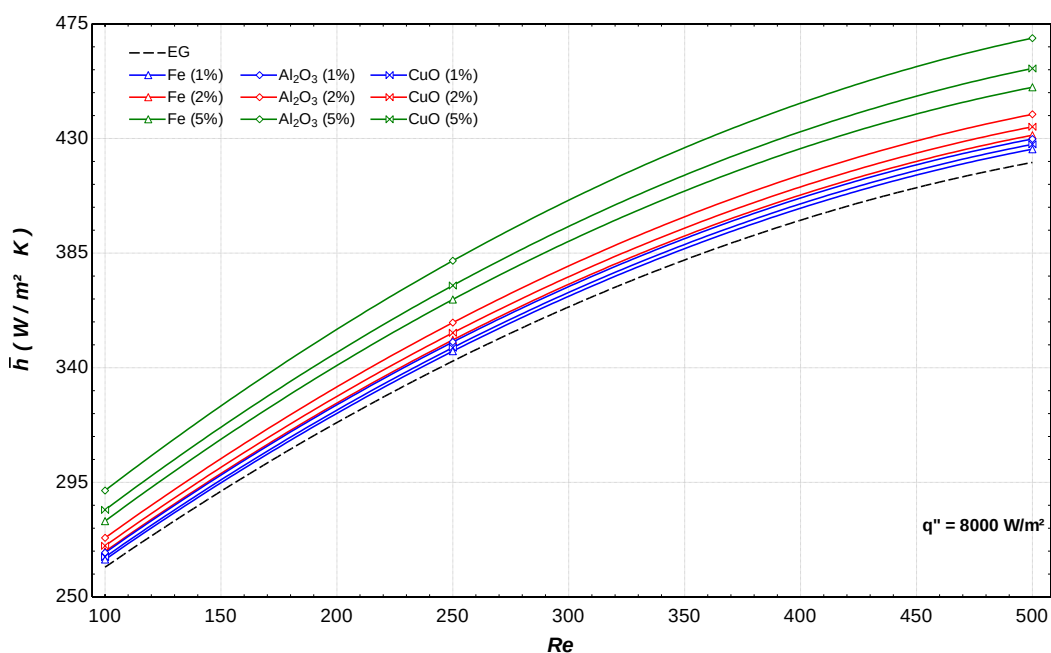


Figura 4.48 – Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em etileno glicol para regime laminar.

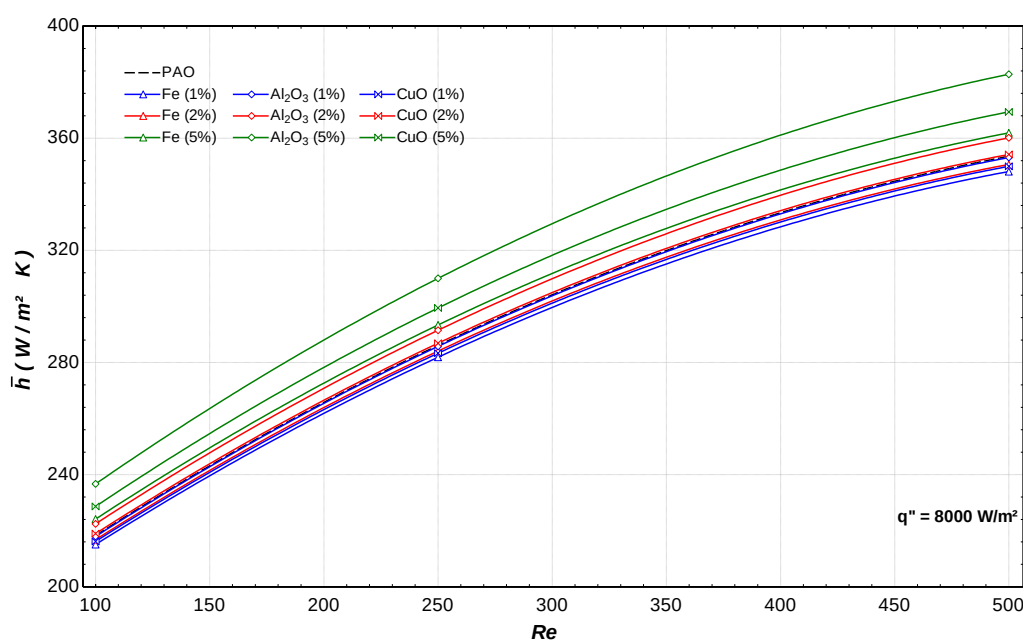


Figura 4.49 – Coeficiente de transferência de calor dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin para regime laminar.

As Figs. 4.47 a 4.49 mostram uma tendência geral de intensificação da transferência de calor por convecção com o aumento da concentração de nanopartículas. Em todos os casos foram obtidos as maiores intensificações para os nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina, seguido pelos nanofluidos com nanopartículas dispersas de óxido de cobre, ferro, cobre e prata, em ordem decrescente.

No entanto, para os casos de nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin é observada uma diminuição, mostrada em destaque na Fig. 4.50.

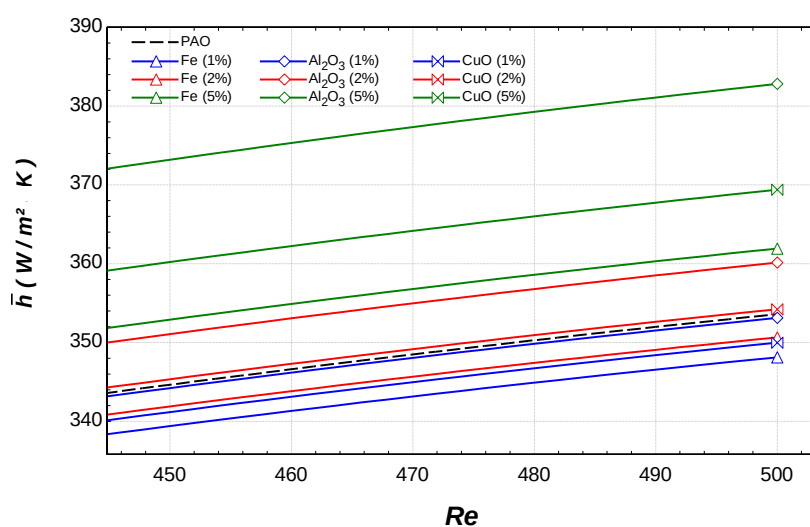


Figura 4.50 – Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin escoando em regime laminar.

É possível que a diminuição mostrada na Fig. 4.50, seja devida à menor intensificação da condutividade térmica para a concentração de 1%, em relação com as demais propriedades dos nanofluidos. Também ocorre uma diminuição para o caso do nanofluido com 2% de concentração volumétrica de nanopartículas de ferro.

A intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção dos nanofluidos baseados em água, escoando em regime turbulento, apresenta as tendências mostradas na Fig. 4.51.

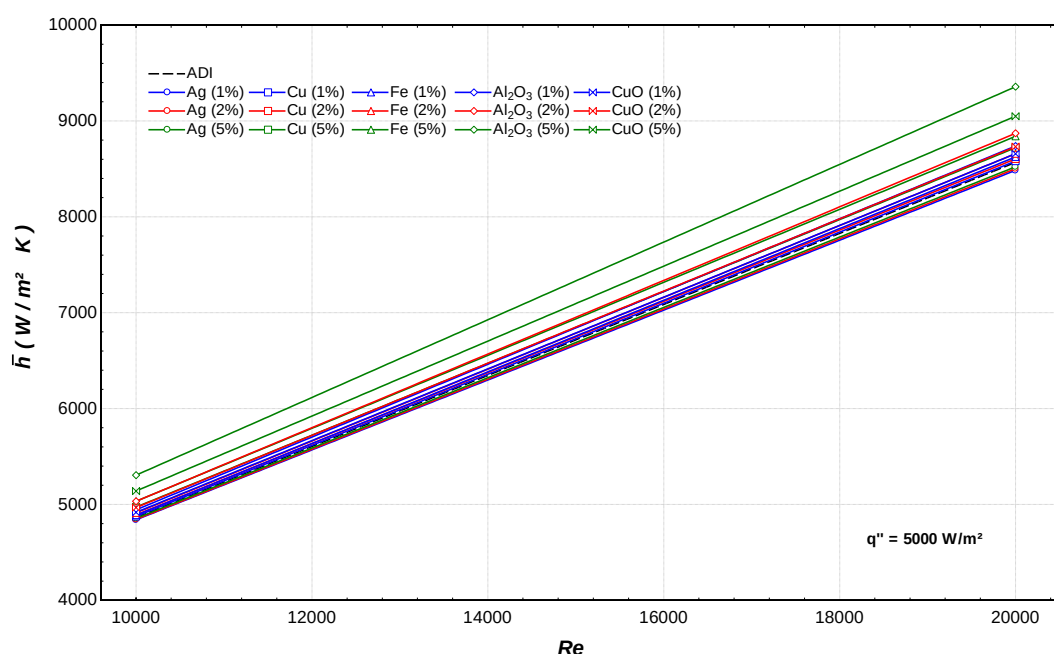


Figura 4.51 – Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em água para regime turbulento.

É observado que a tendência da intensificação valor de $\bar{h}$ é similar à descrita para os escoamentos dos nanofluidos baseados em água escoando em regime laminar. Isto é, com a maior intensificação para os nanofluidos que contêm nanopartículas de cobre, seguido pelos nanofluidos com nanopartículas de óxido de cobre, ferro e cobre. No entanto, para o caso daqueles nanofluidos com nanopartículas de prata dispersas, obteve-se uma diminuição do valor de $\bar{h}$, como ilustrado na Fig. 4.52.

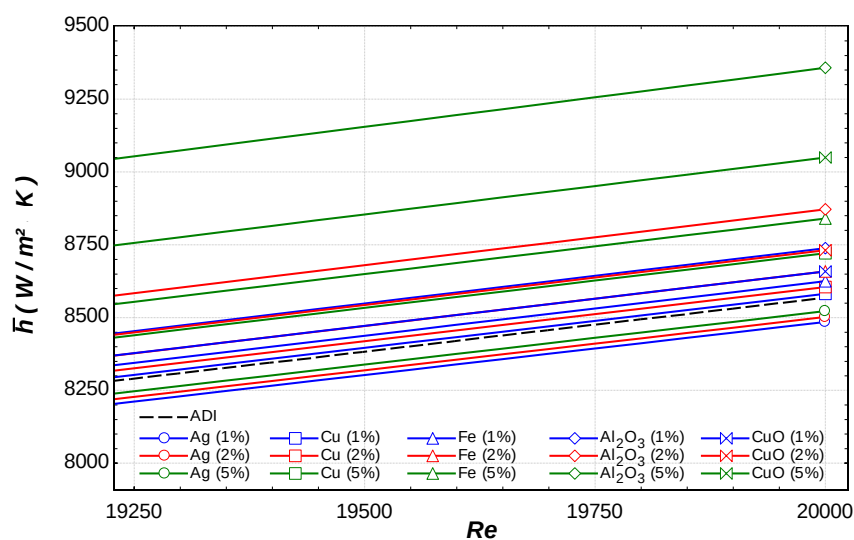


Figura 4.52 – Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em água escoando em regime turbulento.

Neste caso, a diminuição do valor de $\bar{h}$ ocorre somente para os nanofluidos que contêm nanopartículas de prata, escoando em regime turbulento. Esta diminuição pode ser devida ao efeito da alta densidade das nanopartículas de prata, mais influente no aspecto dinâmico do que no aspecto térmico do escoamento.

A Fig. 4.53 mostra a tendência da intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol.

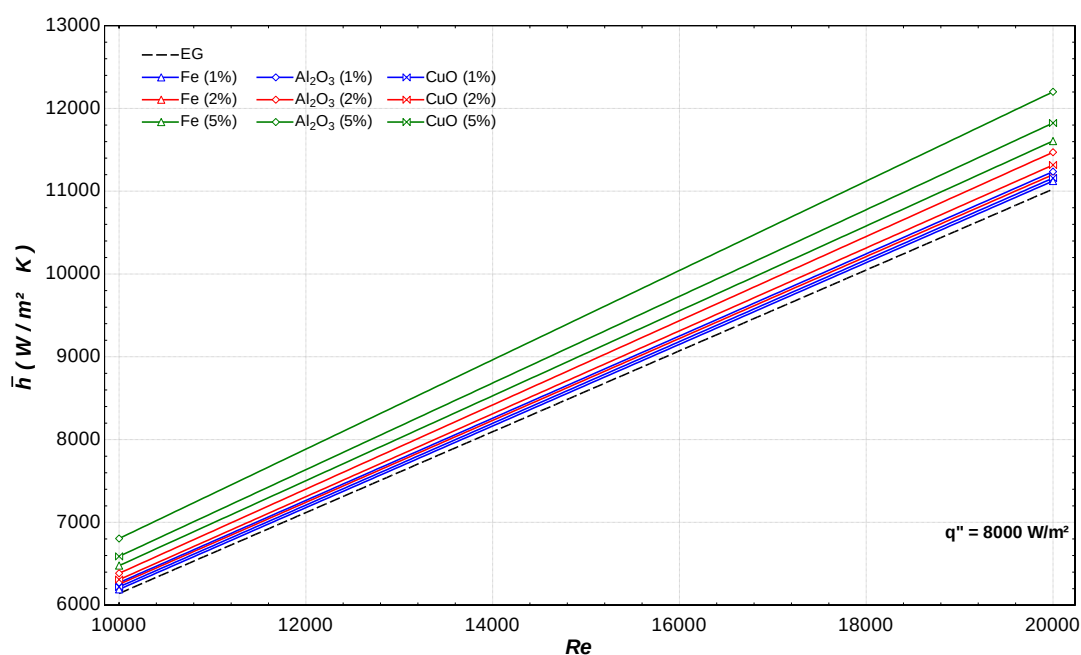


Figura 4.53 – Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em etileno glicol para regime turbulento.

Para os nanofluidos baseados em etileno glicol, a intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção obedece à mesma tendência dos casos anteriores: maior para o uso de nanopartículas de alumina, intermediário para nanopartículas de óxido de cobre e menor para nanopartículas de ferro.

Na Fig. 4.54 é mostrada a tendência da intensificação de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin, escoando em regime turbulento. Neste caso também foram encontradas diminuições no valor de $\bar{h}$.

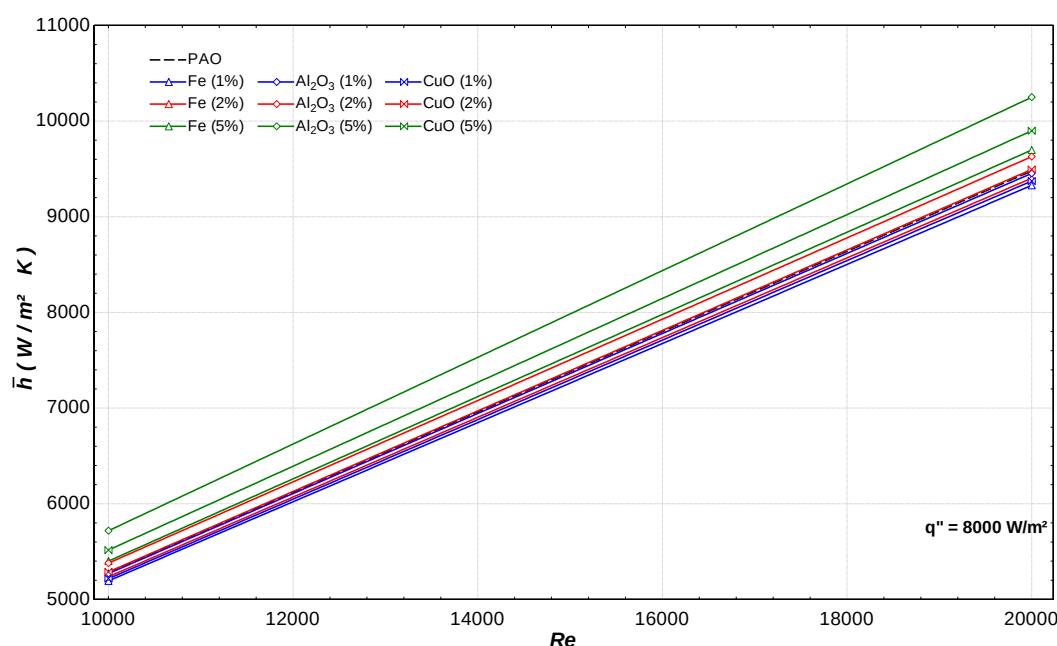


Figura 4.54 – Coeficiente médio de transferência de calor dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin para regime turbulento.

De maneira semelhante aos casos anteriores, esta diminuição ocorre em baixas concentrações, como ilustrado em destaque na Fig. 4.55.

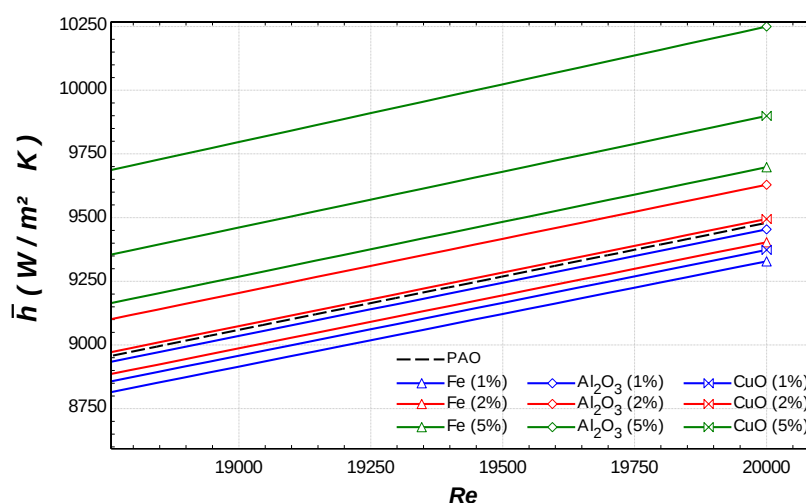


Figura 4.55 – Destaque da diminuição do valor de $\bar{h}$ para nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin escoando em regime turbulento.

Os casos de diminuição do coeficiente de transferência de calor por convecção poderiam se explicar sob a hipótese de que os nanofluidos que apresentam esse fenômeno não conseguem uma intensificação da condutividade térmica superior ao efeito adverso da variação das demais propriedades.

4.4.3. Número de Nusselt

A variação do número de Nusselt médio é mostrada nas Figs. 4.56 a 4.58 para os escoamentos em regime laminar dos nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente.

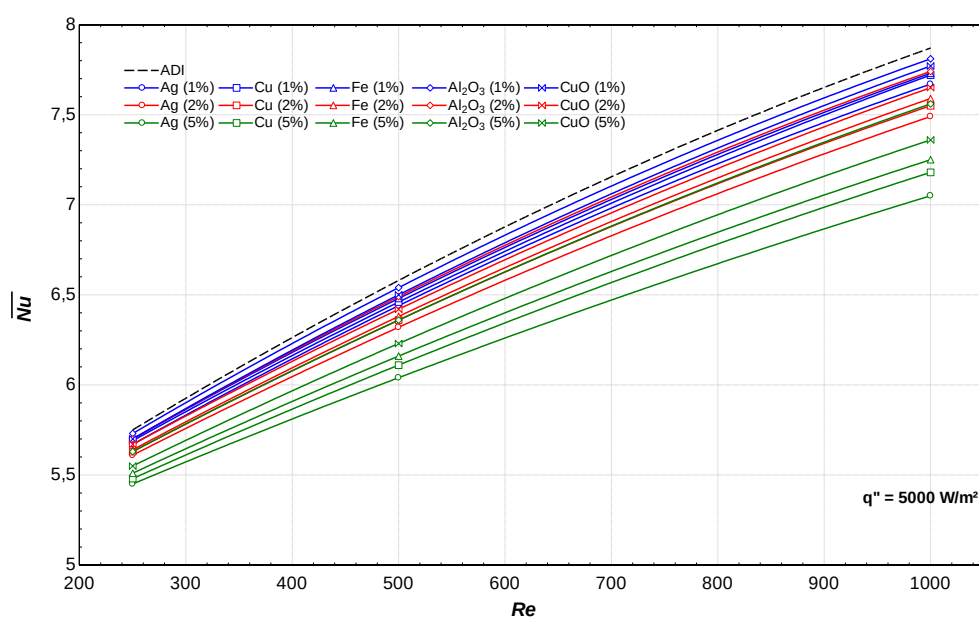


Figura 4.56 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em água (regime laminar)

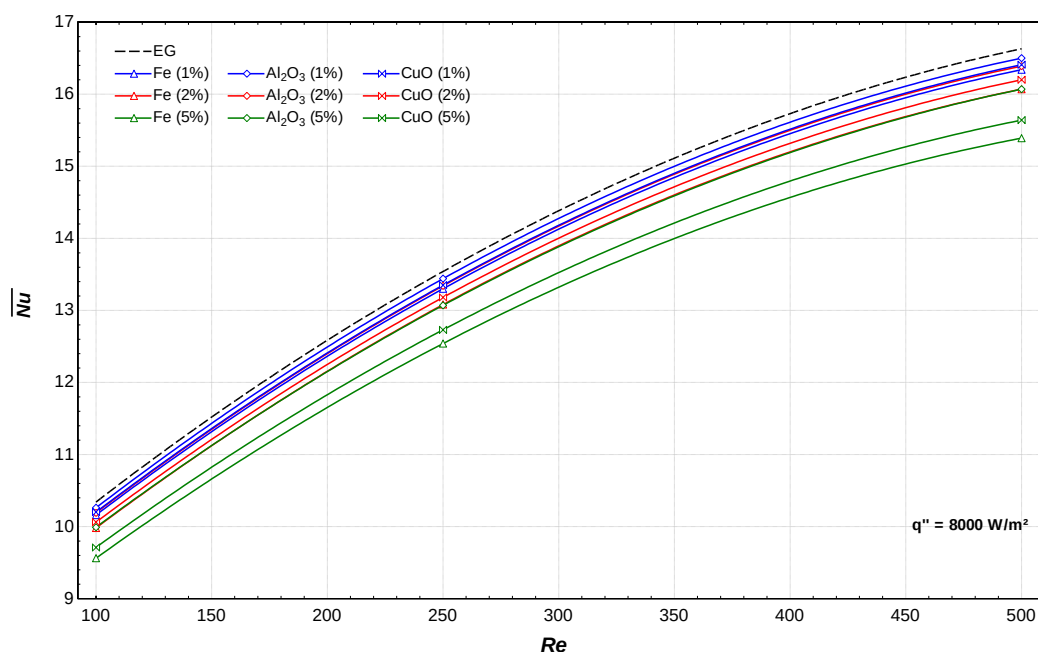


Figura 4.57 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime laminar)

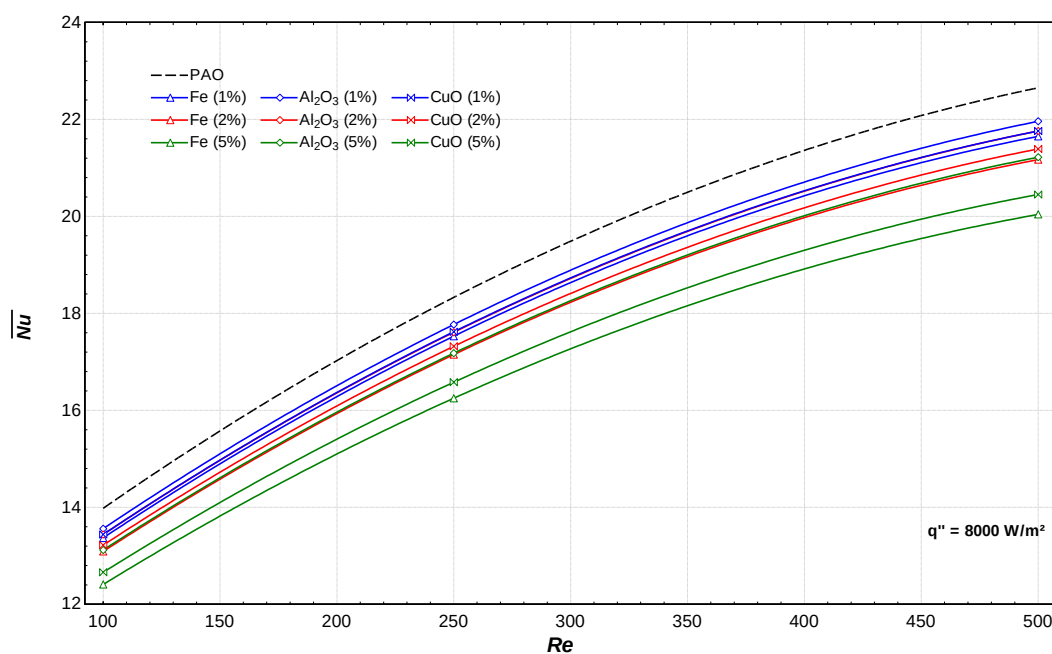


Figura 4.58 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime laminar)

A tendência observada em todos os casos é a diminuição do $\overline{Nu}$ com o incremento da concentração volumétrica para um valor de Re definido. Por outro lado, o $\overline{Nu}$ se incrementa com o aumento do Re em todos os casos.

Em regime turbulento, as tendências se mantêm, como ilustrado nas Figs. 4.59, 4.60 e 4.61 para nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente.

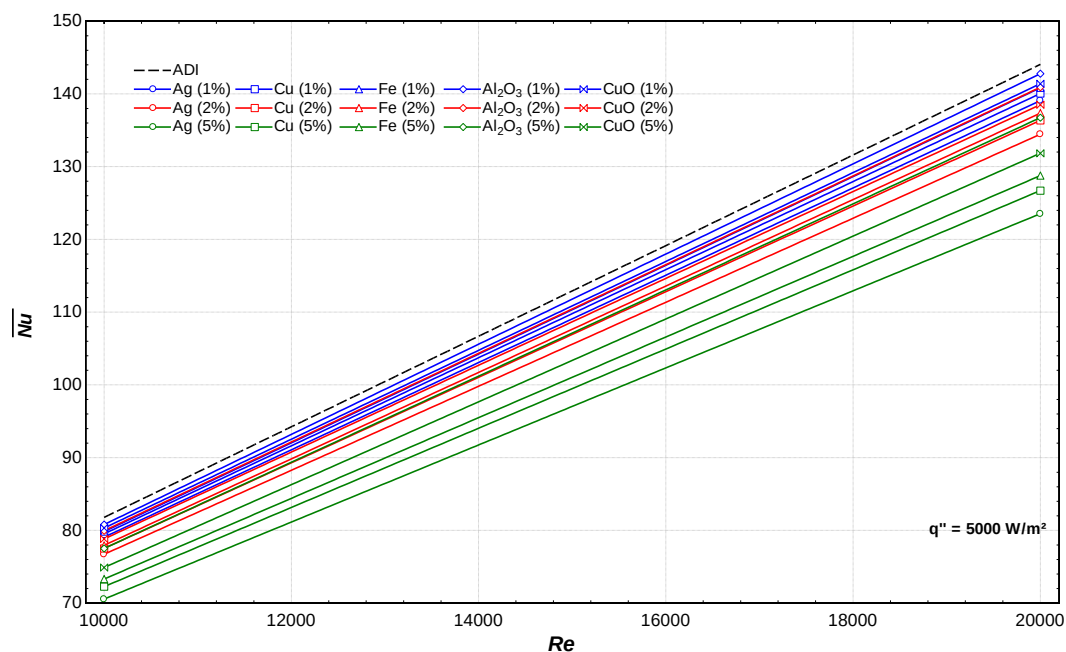


Figura 4.59 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento).

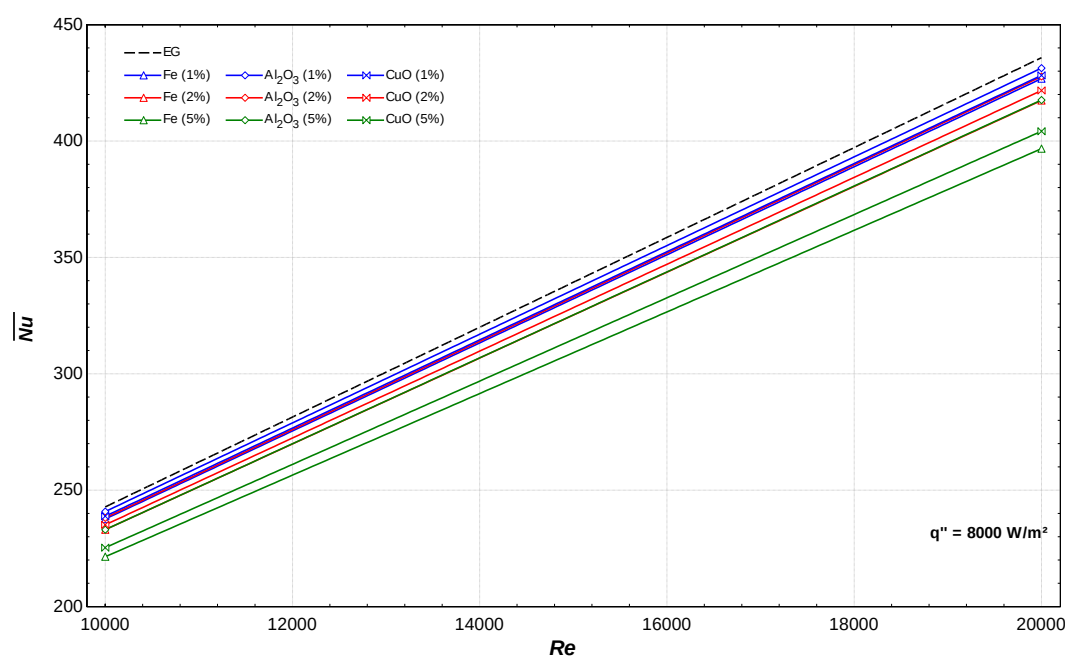


Figura 4.60 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime turbulento).

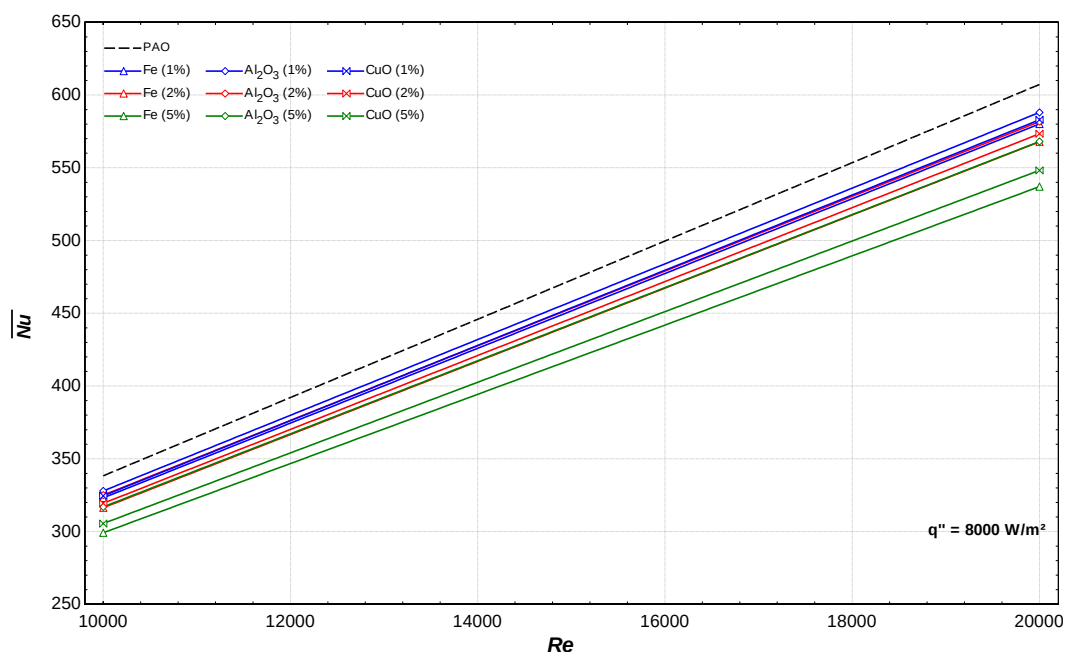


Figura 4.61 – Tendência do $\overline{Nu}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime turbulento).

Os resultados para o número de Nusselt médio em relação com a concentração volumétrica de nanopartículas seguem uma tendência que parece discordante com o fenômeno de intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Porém, fazendo uma análise com base na correlação de Pak e Cho (1998) para convecção de nanofluidos, mostrada na Eq. (4.7), tem-se que, para um determinado número de Reynolds pré-definido e fixo, o número de Nusselt é função somente do número de Prandtl.

$$Nu_{nf} = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,5} \quad (4.7)$$

Como detalhado na seção 4.2.1, com os modelos selecionados para cada propriedade, observou-se que o Pr tende a diminuir com o incremento da concentração volumétrica das nanopartículas. Portanto, o número de Nusselt calculado pela correlação de Pak e Cho também apresentará a mesma tendência de diminuição.

Uma consequência do efeito da concentração volumétrica sobre o número de Nusselt pode ser obtida a partir da comparação dos número de Nusselt do nanofluido e do fluido base, como mostrado na Eq. (4.8).

$$\frac{Nu_{nf}}{Nu_{fb}} = \frac{\frac{h_{nf}D}{k_{nf}}}{\frac{h_{fb}D}{k_{fb}}} = \frac{h_{nf}/h_{fb}}{k_{nf}/k_{fb}} \quad (4.8)$$

Dos resultados mostrados nas Figs. 4.56 a 4.61 é evidente que para todos os casos, o número de Nusselt do fluido base é superior ao dos nanofluidos ($Nu_{fb} > Nu_{nf}$), isto é: $\frac{Nu_{nf}}{Nu_{fb}} < 1$. Desse modo, e com o determinado anteriormente na Eq. (4.8), se obtém a Eq. (4.9).

$$\frac{h_{nf}/h_{fb}}{k_{nf}/k_{fb}} < 1 \quad (4.9)$$

O que indica esta relação é que a intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção é menor que a intensificação da condutividade térmica. Esta tendência pode ser comprovada inclusive para aqueles casos nos quais o valor de h diminuiu (conforme observado na subseção anterior). É importante destacar que esta conclusão tem como base a hipótese de que as propriedades dos nanofluidos obedecem às estimativas dadas pelos modelos selecionados.

4.5. Queda de pressão

Os valores de queda de pressão foram obtidos dos resultados da simulação para o campo de pressões no domínio estudado. Na Fig. 4.62 é mostrada a tendência da queda de pressão em regime laminar para os nanofluidos baseados em água.

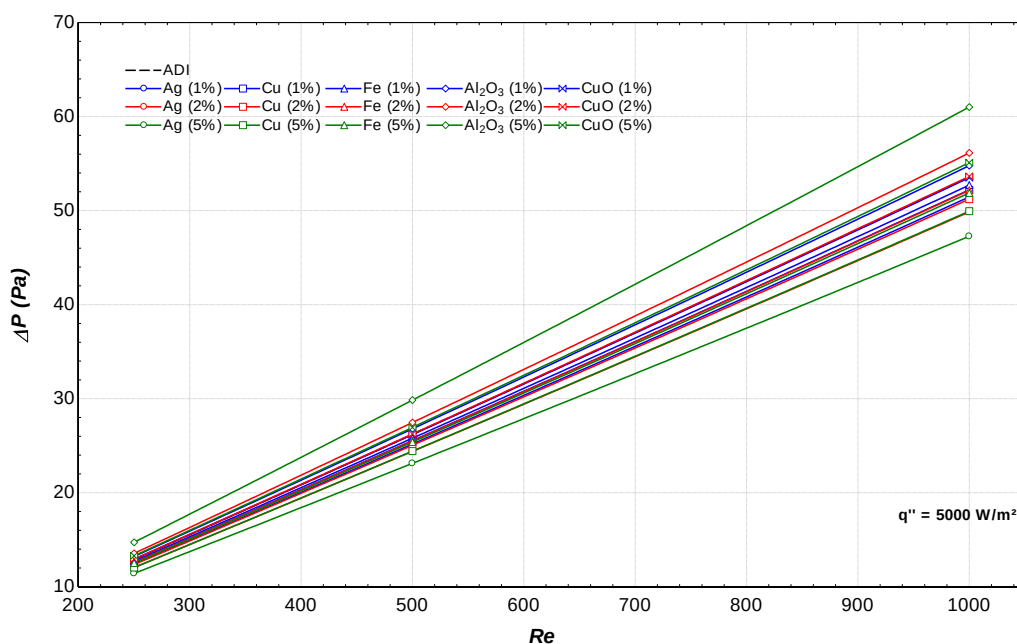


Figura 4.62 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime laminar).

A Fig. 4.63 mostra em destaque o comportamento da tendência da queda de pressão em regime laminar para os nanofluidos baseados em água. É interessante destacar que existe um incremento da queda de pressão para os nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina e óxido de cobre (óxidos metálicos) e uma diminuição da queda de pressão para as nanopartículas de prata, cobre e ferro (metais).

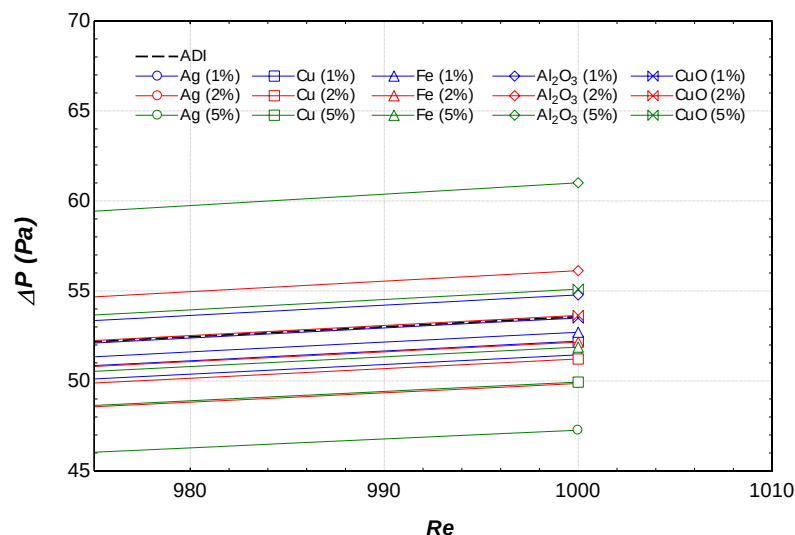


Figura 4.63 – Destaque da tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime laminar).

A mesma tendência é observada na Fig. 4.64, para o caso dos nanofluidos baseados em etileno glicol, em regime laminar.

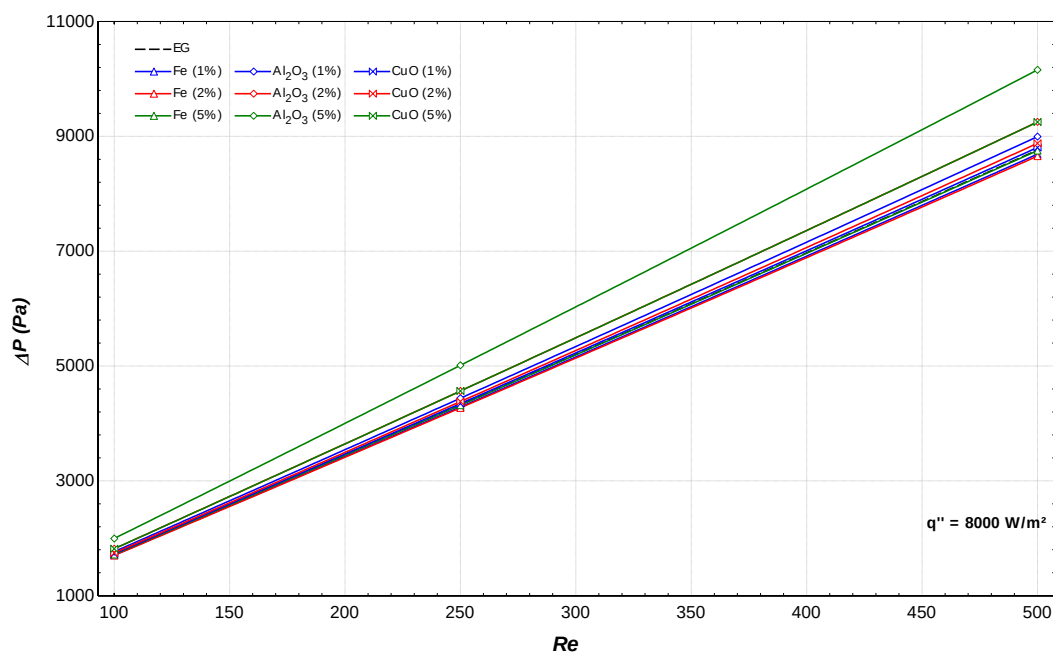


Figura 4.64 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime laminar).

Para o caso dos nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin, a tendência se mantém para aqueles que contêm nanopartículas de alumina, conforme mostrado na Fig. 4.65. Neste caso, os nanofluidos que contêm óxido de cobre mostram uma diminuição na queda de pressão.

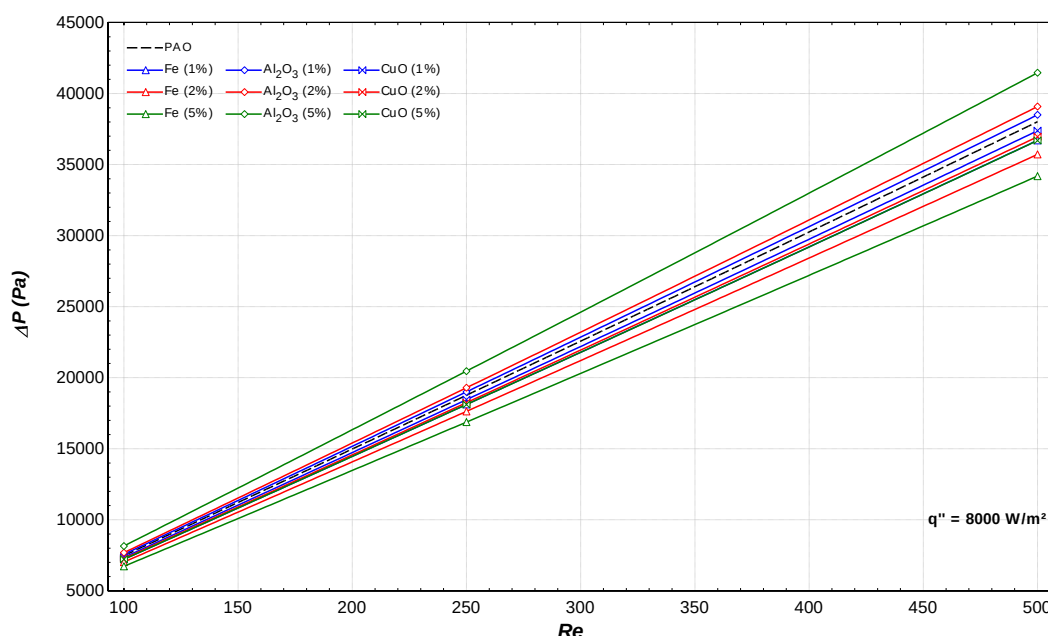


Figura 4.65 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime laminar).

Em regime turbulento, os nanofluidos baseados em água mostram um comportamento em relação com a queda de pressão como ilustrado na Fig. 4.66.

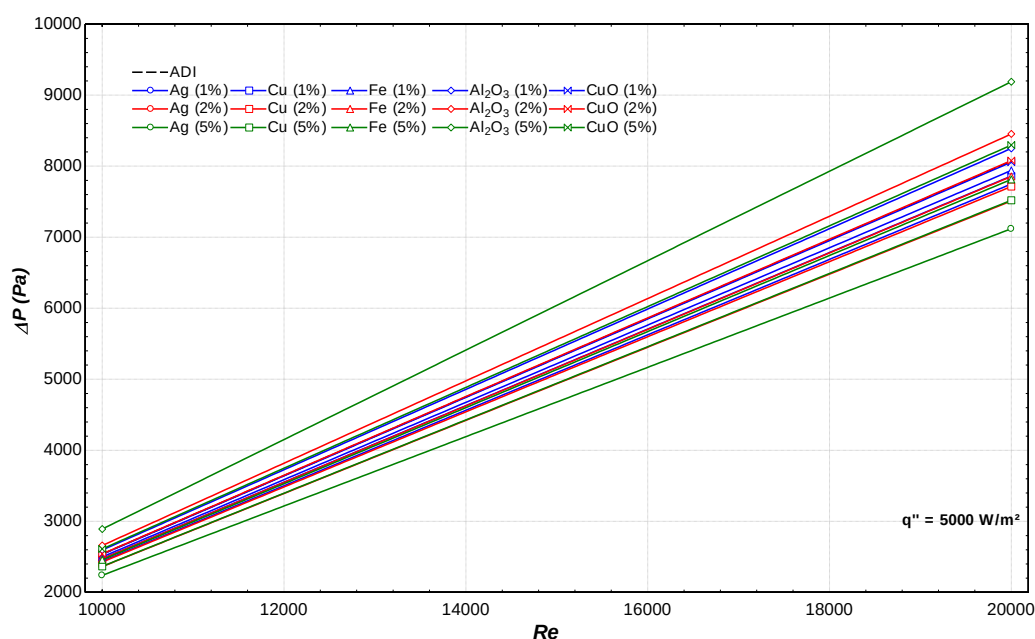


Figura 4.66 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento).

Na Fig. 4.67 é mostrada em destaque a tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água para regime turbulento. Nela, é observado um comportamento similar ao mostrado para os mesmos nanofluidos escoando em regime laminar, com incrementos na queda de pressão apenas para os casos dos nanofluidos que contém nanopartículas de óxidos metálicos.

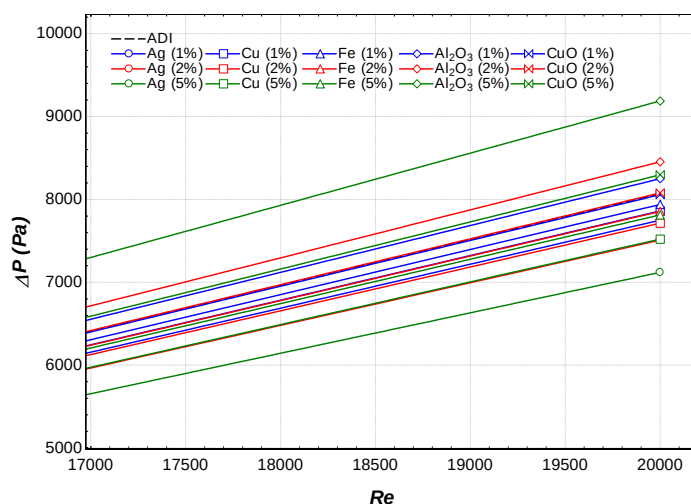


Figura 4.67 – Destaque da tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em água (regime turbulento).

Para os nanofluidos baseados em etileno glicol escoando em regime turbulento, a tendência também é similar ao caso em regime laminar, conforme o mostrado na Fig. 4.68.

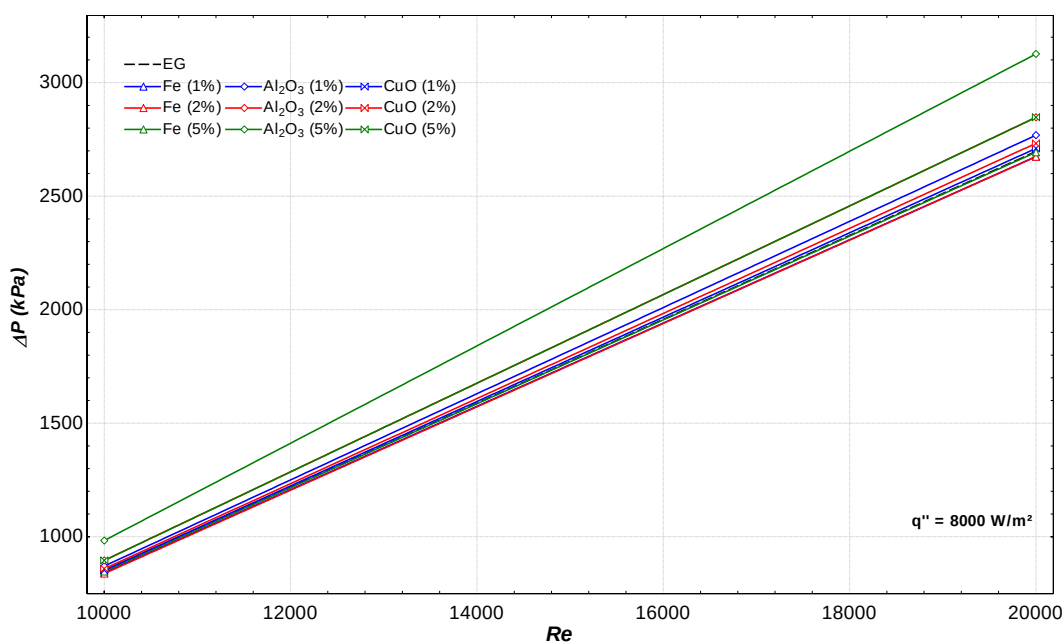


Figura 4.68 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em etileno glicol (regime turbulento).

No caso dos nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin escoando em regime turbulento, a tendência mostrada em regime laminar persiste, apresentando incrementos na queda de pressão apenas para aqueles nanofluidos que contêm nanopartículas de alumina, como ilustrado na Fig. 4.69.

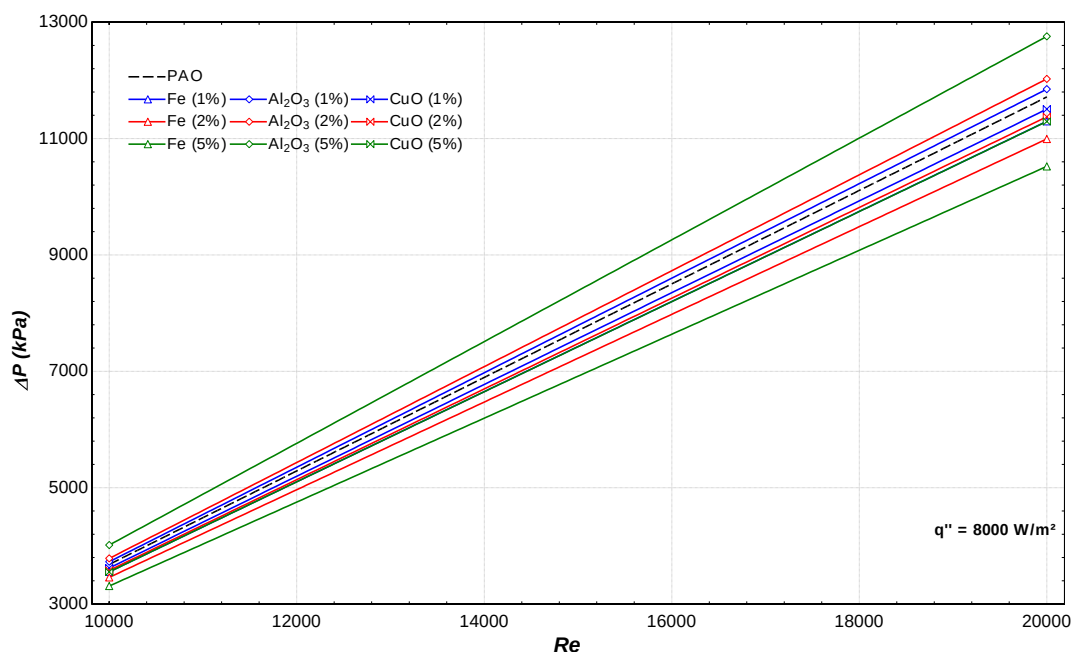


Figura 4.68 – Tendência da queda de pressão para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin (regime turbulento).

É importante destacar as altas quedas de pressão observadas, com valores de até 10 kPa para os nanofluidos baseados em etileno glicol e até 40kPa para nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin. Em regime turbulento a queda de pressão atinge valores máximos de mais de 3MPa para os nanofluidos baseados em etileno glicol e quase 13 MPa para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin. Tais valores são devidos aos elevados valores da viscosidade dos fluidos base mencionados. Nesse sentido, também é importante destacar a grande influência que o numero de Reynolds possui sobre a queda de pressão.

Nas Figs. 4.62 a 4.68 observa-se um comportamento aparentemente heterogêneo, tanto com o aumento da concentração volumétrica como com a natureza das nanopartículas e suas propriedades. Porém, se analisada a correlação de Darcy para o cálculo da queda de pressão, Eq. (4.10), tanto em regime laminar como turbulento, pode-se obter uma explicação do observado nas figuras precedentes.

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (4.10)$$

O valor do fator de atrito pode ser determinado pelas Eqs. (4.11) e (4.12) para regime laminar e turbulento, respectivamente.

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (4.11)$$

$$f = [0,790 \ln(Re_D) - 1,64]^{-2}, \quad \text{para } 3000 \gtrsim Re_D \gtrsim 5 \times 10^6 \quad (4.12)$$

Sendo que para ambos os casos, o fator de atrito é função do Re somente e desenvolvendo a velocidade u_m também em função do Re , é obtida a queda de pressão como mostrada na Eq. (4.13)

$$\Delta p = f_{(Re)} \frac{L}{D} \frac{\rho \left(\frac{Re \mu}{\rho D}\right)^2}{2} = f_{(Re)} \frac{L}{D^3} \frac{Re^2}{2} \frac{\mu^2}{\rho} \quad (4.13)$$

Quando comparadas as quedas de pressão do fluido base e os nanofluidos para uma determinada geometria e Re , é obtida a expressão dada na Eq. (4.14).

$$\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{fb}} = \frac{(\mu_{nf}/\mu_{fb})^2}{\rho_{nf}/\rho_{fb}} \quad (4.14)$$

Finalmente, torna-se evidente que ocorrerá um incremento na queda de pressão sempre que a intensificação da viscosidade for superior ao incremento da massa específica do nanofluido. Se tal incremento for menor, ocorrerá uma diminuição da queda de pressão. Este comportamento, além de observado nas figuras desta seção, foi comprovado através do cálculo e comparação das intensificações da viscosidade e da massa específica.

4.6. Resumo dos resultados

A seguir é apresentado um resumo dos principais resultados obtidos no presente trabalho. Na Tab. 4.2 são mostrados os valores percentuais de intensificação para a massa específica, condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos, assim como também as porcentagens de diminuição para o caso do calor específico, com base nas propriedades calculadas a partir dos modelos selecionados na subseção 3.2.

Tabela 4.2. Variações das propriedades dos nanofluidos

VARIAÇÕES DAS PROPRIEDADES DOS NANOFLUIDOS						
Fluido Base	Nanopartícula	$\phi_{np}(\%)$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kg-K)}$	$k \text{ (W/m-K)}$	$\mu \text{ (Pa-s)}$
F1 (ADI ¹)	N1 (Prata)	1%	9.52%	-9.07%	3.02%	2.57%
		2%	19.04%	-16.68%	6.10%	5.26%
		5%	47.60%	-33.64%	15.72%	14.13%
	N2 (Cobre)	1%	7.95%	-7.51%	3.02%	2.57%
		2%	15.89%	-14.00%	6.09%	5.26%
		5%	39.73%	-29.03%	15.72%	14.13%
	N3 (Ferro)	1%	6.90%	-6.61%	2.96%	2.57%
		2%	13.79%	-12.42%	5.98%	5.26%
		5%	34.48%	-26.27%	15.42%	14.13%
	N4 (Alumina)	1%	2.87%	-3.00%	2.90%	2.57%
		2%	5.74%	-5.83%	5.85%	5.26%
		5%	14.36%	-13.49%	15.07%	14.13%
	N5 (Óxido de cobre)	1%	5.33%	-5.24%	2.96%	2.57%
		2%	10.66%	-9.98%	5.98%	5.26%
		5%	26.64%	-21.81%	15.41%	14.13%
F2 (EG ²)	N3 (Ferro)	1%	6.08%	-5.46%	3.00%	2.57%
		2%	12.16%	-10.32%	6.06%	5.26%
		5%	30.40%	-22.19%	15.63%	14.13%
	N4 (Alumina)	1%	2.47%	-2.19%	2.97%	2.57%
		2%	4.94%	-4.28%	6.01%	5.26%
		5%	12.35%	-10.00%	15.48%	14.13%
	N5 (Óxido de cobre)	1%	4.67%	-4.22%	3.00%	2.57%
		2%	9.35%	-8.09%	6.06%	5.26%
		5%	23.37%	-17.92%	15.62%	14.13%
F3 (PAO ³)	N3 (Ferro)	1%	8.97%	-7.33%	3.01%	2.57%
		2%	17.94%	-13.54%	6.09%	5.26%
		5%	44.85%	-27.56%	15.69%	14.13%
	N4 (Alumina)	1%	3.89%	-2.89%	2.99%	2.57%
		2%	7.77%	-5.58%	6.05%	5.26%
		5%	19.44%	-12.59%	15.60%	14.13%
	N5 (Óxido de cobre)	1%	6.99%	-5.67%	3.01%	2.57%
		2%	13.98%	-10.64%	6.08%	5.26%
		5%	34.95%	-22.47%	15.69%	14.13%

¹ ADI: água deionizada; ² EG: etileno glicol; ³ PAO: poli-alfa-oleofin.

Finalmente, nas Tabs. 4.3, 4.4 e 4.5 são mostradas as porcentagens de intensificação do coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente.

Tabela 4.3. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em água, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta \bar{h}$ (%)														
	Prata			Cobre			Ferro			Alumina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$
250	1,57	3,37	9,54	1,82	3,73	10,31	1,96	3,90	10,62	2,48	4,88	12,62	2,09	4,35	11,40
500	0,82	1,83	6,16	1,08	2,59	7,46	1,34	2,79	8,10	2,19	4,42	11,25	1,70	3,34	9,25
1000	0,39	0,85	3,54	0,94	1,68	5,43	1,12	2,18	6,24	2,08	4,05	10,54	1,61	2,93	7,88
10000	-0,40	-0,49	-0,18	0,24	0,56	2,23	0,51	1,00	3,47	1,66	3,47	9,08	1,12	2,14	5,67
20000	-0,54	-0,97	-0,77	0,15	0,42	1,78	0,66	1,05	3,17	1,98	3,54	9,21	1,05	1,90	5,62

Tabela 4.4. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em etileno glicol, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta \bar{h}$ (%)								
	Ferro			Alumina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$
250	1,14	2,38	6,92	2,16	4,40	11,50	1,53	3,20	8,59
500	1,16	2,44	7,09	2,20	4,41	11,51	1,57	3,25	8,67
1000	1,23	2,54	7,01	2,19	4,48	11,60	1,67	3,32	8,76
10000	0,81	1,81	5,47	2,13	3,94	10,80	1,30	2,72	7,28
20000	0,89	1,59	5,27	1,91	4,03	10,65	1,20	2,63	7,24

Tabela 4.5. Intensificação do valor de $\bar{h}$ para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta \bar{h}$ (%)								
	Ferro			Alumina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$	$\phi_{np}=1\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=5\%$
250	-1,47	-0,68	2,69	-0,15	1,91	8,43	-0,96	0,31	4,76
500	-1,48	-0,71	2,54	-0,13	1,88	8,35	-0,98	0,27	4,66
1000	-1,54	-0,83	2,36	-0,13	1,85	8,27	-1,02	0,18	4,47
10000	-1,62	-0,80	2,30	-0,18	1,89	8,30	-1,18	0,15	4,47
20000	-1,59	-0,80	2,31	-0,27	1,58	8,13	-1,12	0,16	4,43

Da Tab. 4.3, nota-se que a maior intensificação da transferência de calor, em ambos os regimes laminar e turbulento, ocorre com o uso do nanofluido de água e nanopartículas de alumina, seguido pelos nanofluidos de água com nanopartículas de óxido de cobre, ferro, cobre e prata, respectivamente. Em geral, é notado o incremento das intensificações com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas.

No caso dos nanofluidos com nanopartículas de prata escoando em regime turbulento, foram obtidas diminuições na intensificação de calor. Isto pode se dever, principalmente, ao efeito da grande massa específica das nanopartículas de prata, quando comparadas com as restantes.

Na Tab. 4.4 também são visíveis as maiores intensificações na transferência de calor nos nanofluidos baseados em etileno glicol com nanopartículas de alumina. Em segundo lugar estão os nanofluidos com óxido de cobre, e finalmente os nanofluidos com nanopartículas de ferro. Nestes nanofluidos as intensificações aumentam com o incremento da concentração volumétrica das nanopartículas.

Na Tab. 4.5 notam-se maiores intensificações nos casos dos nanofluidos baseados em poli-alfa-olefin com nanopartículas de alumina, seguidos pelos nanofluidos com nanopartículas de óxido de cobre e ferro, respectivamente. Para os nanofluidos com baixa concentração volumétrica de nanopartículas (1% e 2% de nanopartículas de ferro, e 1% para alumina e óxido de cobre), ocorreu uma diminuição da transferência de calor. Neste caso é importante destacar a alta viscosidade do poli-alfa-olefin (sobretudo quando comparada com a água).

Para os casos de nanofluidos em regime laminar apresentados nas Tabs. 4.3 a 4.5 notaram-se intensificações da transferência de calor com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas e com o aumento do número de Reynolds. Em regime turbulento, a tendência de aumento da intensificação é mantida apenas para o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas. Neste caso, com o aumento do número de Reynolds foram obtidas, em geral, menores intensificações da transferência de calor.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Para todos os nanofluidos estudados, e com base nos modelos descritos no desenvolvimento da dissertação, se observaram os seguintes efeitos sobre suas propriedades na faixa de concentrações dada:

- A intensificação da massa específica é superior para os nanofluidos que contêm nanopartículas metálicas (prata, cobre e ferro), em comparação com os nanofluidos que utilizam nanopartículas de óxidos metálicos (óxido de cobre e alumina), e se vê incrementada com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas. O maior valor obtido foi de 46,7% de intensificação da massa específica para o nanofluido com água como fluido base e nanopartículas de prata.
- A diminuição do calor específico mostra-se maior para os nanofluidos compostos por nanopartículas metálicas, com tendência a decrescer com o incremento da concentração volumétrica. Neste caso, as nanopartículas de prata conseguiram diminuições máximas de 33,6%, 22,2% e 27,6% para os nanofluidos baseados em água, etileno glicol e poli-alfa-oleofin, respectivamente. Em contraste, as diminuições devidas à dispersão de nanopartículas de alumina foram de 13,5%, 10% e 12,6% para os mesmos fluidos base.
- A intensificação da condutividade térmica mostra valores próximos, sobretudo nos casos que apresentam condutividades térmicas relativas similares, e tende a aumentar com o incremento da concentração volumétrica de nanopartículas. Assim, todos nanofluidos apresentam intensificações próximas a 3%, 6% e 15%, na ordem

correspondente ao aumento da concentração volumétrica de nanopartículas, isto é, 1%, 2% e 5%, respectivamente.

- A intensificação da viscosidade mantém a tendência de se incrementar com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas. Este pode ser o resultado menos consistente, pois o modelo utilizado desconsidera a natureza da fase sólida dos nanofluidos.

Apesar da grande maioria das pesquisas tratar o efeito isolado do incremento da condutividade sobre a intensificação da transferência de calor, durante o desenvolvimento deste trabalho, foi evidente que tal intensificação devia-se também às variações das demais propriedades dos nanofluidos. Nesse sentido, é interessante ressaltar a importância de números adimensionais como o Pr e outros parâmetros como a difusividade térmica, na tentativa de determinar o efeito combinado das variações das propriedades dos nanofluidos.

Referido ao coeficiente de transferência de calor por convecção, para todas as simulações realizadas foi obtida a maior intensificação para os nanofluidos com nanopartículas de alumina. Tal intensificação tende a diminuir para os nanofluidos compostos por nanopartículas de óxido de cobre, ferro, cobre e prata, nessa ordem.

Este comportamento difere da consideração inicial que apontava a intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção como consequência direta do incremento da condutividade térmica. Nesse sentido, a influência da massa específica e do calor específico, como fatores relevantes na transferência de calor por convecção sob as condições do presente trabalho, parece ser maior do que o esperado. Uma análise mais detalhada é necessária para confirmar esta hipótese. É importante destacar que o calor específico segue a mesma ordem de aumento que o coeficiente de transferência de calor, e a massa específica segue a ordem inversa.

Deve-se levar em consideração que a base para o desenvolvimento deste trabalho se encontra nos modelos utilizados para a determinação das propriedades modificadas dos nanofluidos (sendo estes os mais conservadores), e que as simulações numéricas foram realizadas sobre a hipótese de um escoamento monofásico.

Em relação ao comportamento dinâmico dos escoamentos, a intensificação do coeficiente de calor por convecção tende a diminuir com o aumento do número de Reynolds. Este comportamento é claramente visível para os nanofluidos baseados em água e etileno glicol, enquanto que para os nanofluidos baseados em poli-alfa-oleofin, embora mantida, a tendência não é tão acentuada.

Também é importante destacar que a intensificação da condutividade térmica foi maior do que a intensificação do coeficiente de transferência de calor por convecção em todos os

casos estudados. Isto confirma o explicado no capítulo anterior acerca da influência da diminuição do número de Nusselt.

No tocante à queda de pressão, destaca-se a intensificação obtida para todos os nanofluidos com nanopartículas de alumina. Este comportamento é consistente com o esperado e somente é reproduzido para os nanofluidos baseados em água e etileno glicol com nanopartículas de óxido de cobre. No entanto, e conforme o desenvolvido na parte final do capítulo anterior para as condições definidas do problema, a variação da queda de pressão é função do quadrado da intensificação da viscosidade e do inverso da intensificação da massa específica.

Para futuros trabalhos, sugerem-se as seguintes considerações:

- No possível, adotar a estrutura geral da metodologia usada no presente trabalho, isto é: determinação das propriedades modificadas dos nanofluidos e construção de um *banco de propriedades*, definição das condições físicas do problema a analisar, simulação dos escoamentos, processamento dos dados e variação das condições físicas e propriedades dos nanofluidos.
- Utilizar modelos mais complexos para a determinação das propriedades dos nanofluidos, que permitam uma melhor descrição dos fenômenos físicos que ocorrem na intensificação das mesmas, especialmente para a condutividade térmica e a viscosidade e, se for possível, empregar valores medidos experimentalmente para fins de comparação.
- Simular o escoamento de nanofluidos sob diferentes condições de entrada, como por exemplo: vazão volumétrica constante, velocidade de entrada constante. Nestes casos, é esperado que a variação no número de Reynolds não seja tão drástica, e se consigam valores de queda de pressão mais coerentes.
- Validar os resultados do presente trabalho mediante a utilização de uma bancada experimental segundo as condições apresentadas aqui, com a tentativa de obter um modelo semi-empírico de cálculo da transferência de calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **CFX-Pre User's Guide**. Release 12.0. ANSYS, Inc. abr, 2009.

BATCHELOR, G.K. The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, **Journal of Fluid Mechanics**, V.83, p. 97-117, 1977.

BENVENSITE, Y., Effective Thermal Conductivity of Composites with a Thermal Contact Resistance between the Constituents: Nondilute Case, **Journal of Applied Physics**, v.61, p. 2840-2843, 1987.

BHATTI, M.S.; SHAH, R.K. **Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer**, c.4, Ed. Wiley-Interscience, New York, 1987.

BIANCO, V.; CHIACCHIO, F.; MANCA, O.; NARDINI, S. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, **Applied Thermal Engineering**, v.29, n.18, p. 3632 – 3642, jun. 2009.

BRINKMANN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v.20, p. 571-573, mai. 1952.

BRUGGEMAN, D.A.G. Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen. **Annalen der Physik**, v.24, p. 636–679, 1935.

BRUIJIN, H. The viscosity of suspensions of spherical particles, **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**, v.61, p. 863-874, abr. 1942.

BUONGIORNO, J.; HU, L.W.; APOSTOLAKIS, G.; HANNINK, R.; LUCAS, T.; CHUPIN, A. A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors, **Nuclear Engineering and Design**, v.239, n.5, p. 831-964, mai. 2009.

BUONGIORNO, J.; et. al. (2010). The international nanofluid property benchmark exercise. **Journal of Applied Physics**, v.106, n. 0943121, p. 1-14, fev. 2010.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**, 3.ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2009.

CHANG H.; TSUNG, T.T.; CHEN, L.C.; TANG Y.C.; LIN, H.M.; LIN, C.K.; JWO, C.S. Nanoparticle suspension preparation using the arc spray nanoparticle synthesis system combined with ultrasonic vibration and rotating electrode. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v.26, p. 552-558, nov. 2003.

CHEN, H., YANG, W., HE, Y., DING, Y., ZHANG, L., TAN, C., LAPKIN, A., BAVYKIN, D., Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids), **Powder Technology**, v.183, p. 63-72, 2008.

CHEN, J.; HAMON, M.A.; HU, H.; CHEN, Y.; RAO, A.M.; EKLUND, P.E; HADDON, R.C. Solution Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes, **Science**, v.2, n.5386, p.95-98, 1998.

CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. **Applied Physics Letters**, v.91, n.23, p. 233103, jan. 2007.

CHOI, S.U.S.; ZHANG, Z. G.; YU, W.; LOCKWOOD, F. E.; GRULKE, E. A. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**, v.79, n.14, p.2252, 2001.

COLBURN, A.P. A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with liquid fraction. **Transactions of the AIChE**, v.29, p. 174–210, 1933.

EASTMAN, J.A.; CHOI, S.U.S., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, **Applied Physics Letters**, v.78, p. 718-720, out. 2001.

EASTMAN, J.A.; PHILLPOT, S.R.; CHOI, S.U.S.; KEBLINSKI, P. Thermal Transport in Nanofluids1. **Annual Review of Materials Research**, v.34, n.1, p. 219-246, 2004.

EIJKEL, J.C.T.; BERG, A. Nanofluidics: what is it and what can we expect from it? **Microfluid. Nanofluid.** v.1 p. 249–267, 2005.

EINSTEIN, A.; Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, **Ann. Der Physik**, v.19, p. 289, dec. 1906.

DITTUS F. W.; BOELTER L. M. K. Heat Transfer in Automobile Radiators of Tubular Type, University of California Publications in Engineering 2, p. 443, 1930.

FEYNMAN, R.P. There's plenty of room at the bottom. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, 1959. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v.1, n.1, p. 60-66, mar. 1992.

FLUENT INC. **Fluent 6 User's Guide**. New York, 2006.

FOTUKIAN, S.M., ESFAHANY, M.N., Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube”, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.37, p. 214–219, 2010.

FONSECA, H.M. **Caracterização termofísica de nanofluidos**, 2010, 93 f., Dissertação de mestrado –Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRICKE, H. A Mathematical treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Disperse Systems: I. The Electric Conductivity of a suspension of Homogeneous Spheroids, **Physical Review**, v.24, p. 575-587, 1924.

GRANQVIST, C.G.; HUNDERI, O. Conductivity of Inhomogeneous Materials: Effective-Medium Theory with Dipole-Dipole Interaction, **Physical Review B**, v.18, p. 1554-1562, 1978.

GUO, Z.; LIANG, X.; PEREIRA, T.; SCAFFARO, H.; HAHN, T. CuO nanoparticle filled vinyl-ester resin nanocomposites: Fabrication, characterization and property analysis. **Composites Science and Technology**, v.67, p. 2036-2044, jan. 2007.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, **I & EC Fundamentals I**, 1962.

HENDERSON, J.R.; SWOL, F.V. On the interface between a fluid and a planar wall: theory and simulations of a hard sphere fluid at a hard wall. **Molecular Physics**. v.51, p.991-1010, 1984.

HERIS, S.Z.; ESFAHANY, N.M.; ETEMAD, S.G. Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid in circular tube. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.28, p. 203-210, 2007.

HOLM, C.; WEIS, J.-J. The structure of ferrofluids: A status report. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, v.10, p. 133-140, ago. 2005.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de calor e Massa**, 6. ed., LTC, New York, 2002.

JANG, S.P.; CHOI, S.U.S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, v.84, p. 4316-4318, 2004.

JOSHI, A.A.; MAJUMDAR, A. Transient ballistic and diffusive phonon heat transport in thin films. **Journal of Applied physics**, v.74, p. 31-39, 1993.

KEBLINSKI, P., EASTMAN, J., CAHILL, D. Nanofluids for thermal transport. **Materials today**, v.8, n.6, p. 36-44, jun. 2005.

KEBLINSKI, P., PHILLPOT, S.R., CHOI S.U.S., EASTMAN, J.A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.45, n.4, p. 855-863, jan. 2002.

KERNER, E.H. The Electrical Conductivity of Composite Media. **Proceedings of the Physical Society**, B69, p. 802-807, 1956.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Nanoparticles Research**, v.6, p. 577-588, 2005.

KUMAR, D.H; PATEL, H.E.; KUMAR, V.R.R.; SUNDARARAJAN, T.; PRADEEP, T.; DAS, K.D. Model for heat conduction in nanofluids, **Physical Review Letters**, v.93, n.14, p. 144301-1:4, out. 2004.

LAMB, W., WOOD, D.M., ASHCROFT, N.W., Optical properties of small particle composites: Theories and applications, ed. Garland & Tanner, **American Institute of Physics**, New York, p. 240-255, 1978.

LEONG, K.C.; YANG, C.; MURSHED, S.M.S. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. **Journal of Nanoparticle Research**, v.8, n.2, p. 245-254, 2006.

LI, C.; PETERSON, G. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.50, p.4668-4677, 2007.

LIU, M.-S., LIN, M.-C., TSAI, C.Y., WANG, C.-C., Enhancement of thermal conductivity with Cu of nanofluids using chemical reduction method, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.21, p. 58-64, ago. 2006.

LO, C.H., TSUNG, T.T., CHEN, L.C. Shaped-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Crystal Growth**, v. 277, p. 636-642, abr. 2005a.

LO, C.H., TSUNG, T.T., CHEN, L.C., SU, C.H., LIN, H.M. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Nanoparticle Research**, v.7, n.2, pp. 313-320, jun. 2005b.

MAXWELL, J.C., **A treatise on Electricity and Magnetism**, 2nd. Ed., Oxford University Press, Cambridge, 1873.

MAÏGA, S.E.B; NGUYEN, C.T.; GALANIS, N.; ROY, G. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. **Superlattices and Microstructures**, v.35, n.3, p. 543 – 557, 2004.

MURSHED, S.M.S.; LEONG, K.C.; YANG, C. Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v.44, n.4, p. 367-373, 2005.

MURSHED, S.M.S.; LEONG, K.C.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. **Applied Thermal Engineering**, v.28, n.17, p. 2109-2125, jan. 2008.

NI, F., GU, G.Q., CHEN, K.M. Effective Thermal Conductivity of nonlinear composite media with contact resistance, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n.4, p. 943-949, 1997.

PAK, B.C.; CHO, Y.I. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, **Experimental Heat Transfer**, v.11, p.151-170, 1998.

PATEL, H.E.; DAS, S.K.; SUNDARARAJAN, T.; SREEKUMARAN, N.A.; GEORGE, B.; PRADEEP, T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. **Applied Physics Letters**, v.83, n.14, p. 2931, 2003.

PETUKHOV B. S. Heat Transfer and Fluid Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties, **Advanced Heat Transfer**, v.6, p. 503-264, 1970.

PHUOC, T. X.; MASSOUDI, M. Experimental observations of the effects of shear rates and particle concentration on the viscosity of Fe_2O_3 -deionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v.48, n.7, p. 1294-1301, dec. 2008.

PRASHER, R.; EVANS, W.; MEAKIN, P.; FISH, J.; PHELAN, P.; KEBLINSKI, P. Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 89, n.14, p. 143119, out. 2006a.

PRASHER, R.; BATTACHARYA, P.; PHELAN, P.E. Brownian-motion-based convective-conductive model for the thermal conductivity of nanofluids. **Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer**, v.128, n.6, p. 588-596, jun. 2006b.

RAYLEIGH, L. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium, **Philosophy Magazine**, v.34, p. 481, 1892.

REA, U.; MCKRELL, T.; HU, L.-W.; BUONGIORNO, J. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.52, p.2042–2048, 2009.

ROETZEL, W., XUAN, Y., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.43, p. 3701-3707, 2000.

SIEDER, E.N.; TATE, G.E. Heat Transfer and Pressure Drops of Liquids in Tubes, **Ind. Eng. Chem.**, v.28, p. 1429-1436, 1936.

SQUIRES, T.M.; QUAKE, S.R. Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale. **Review of Modern Physics**, v.77, p. 126–977, 2005.

TSUNG, T.T.; CHANG, H.; CHEN, L.C.; HAN, L.L.; LO, C.H.; LIU, M.K. Development of pressure control technique of an arc-submerged nanoparticle synthesis system (ASNSS) for copper nanoparticle fabrication. **Materials Transactions**, v.44, n.6, p.1138-1142, mai. 2003.

VALDERRAMA, E. R. **Modelagem do uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento de motores a combustão interna**, 2010, 97 f., Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

VENERUS, D.C.; ET AL. (2010). Viscosity Measurements on Colloidal Dispersions (Nanofluids) for Heat Transfer Application. **Applied Rheology**, v.20, n.4, 44582, 1-7, fev. 2010.

VAND, V. Viscosity of Solutions and Suspensions I: Theory, **Journal of Physical and Colloid Chemistry**, v.52, p. 277-299, out. 1948.

WANG, X.; XU, X.; CHOI, S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v.13, n.4, p. 474-480, out. 1999.

WANG, B.-X.; ZHOU, L.-P.; PENG, X.-F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.46, n.14, p. 2665-2672, jul. 2003.

WEN D.; LIN G.; VAFAEI S.; ZHANG K. Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology**, v.7, n.2, p. 141–150, 2009.

WIENER, O., Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung. **Der Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klass der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften**, v.32, pp. 507-604, 1912.

XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.48, n.14, p. 2926-2932, 2005.

XUAN, Y.; LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids, **International Journal of Heat and Fluid Transfer**, v.21, p.58–64, 2000.

XUAN, Y.; LI, Q.; HU, W. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v.49, n.4, abr. 2003.

XUE, Q.Z. Model for effective thermal conductivity of nanofluids, **Physics Letters A**, v.307, p. 313 – 317, 2003.

XUE, Q.; XU, W.-M. A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. **Materials Chemistry and Physics**, v.90, p. 298-301, 2005.

YU, W.; CHOI, S.U.S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**, v.5, p. 167-171, fev. 2003.

YU, C.-J.; RICHTER, A.G.; DATTA, A.; DURBIN, M.K.; DUTTA, P. Molecular layering in a liquid on a solid substrate: an X-ray reflectivity study. **Physica B**, v.31, p.283:27, 2000.

ZHOU, L.-P., WANG, B.-X, PENG, X.-F., DU, X.-Z., YANG, Y.-P., On the specific heat capacity of CuO nanofluid, **Advances in Mechanical Engineering**, v.2010:172085, 2010.

ZHU, H.; LIN, Y.; YIN, Y. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.277, n.1, set. 2004.

ZHU, Y.; ZHAO, W.; CHEN, H.; SHI, J. A Simple One-Pot Self-Assembly Route to Nanoporous and Monodispersed Fe_3O_4 Particles with Oriented Attachment Structure and Magnetic Property, **Journal of Physical Chemistry C**, v.111, n.14, p. 5281–5285, 2007.