

GUILHERME AZEVEDO OLIVEIRA

Síntese e caracterização de nanofluidos de prata



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

GUILHERME AZEVEDO OLIVEIRA

Síntese e caracterização de nanofluidos de prata

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

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

O48s Oliveira, Guilherme Azevedo, 1989-
2012 Síntese e caracterização de nanofluidos de prata / Guilherme
Azevedo Oliveira. - 2012.
120 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.

Dissertação (mestrado) ó Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Calor - Transmissão - Teses. I.
Bandarra Filho, Enio Pedone. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela oportunidade, orientação e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho Juan Alegrias, Arthur Antunes e Luís Manoel, pela incansável cooperação nos momentos necessários.

Ao Prof. Rafael Ariza Gonçalves e ao técnico Flávio do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, pela disponibilização de seu tempo e das dependências do laboratório, além das contribuições científicas ao trabalho.

Aos integrantes do Grupo de Nanofluidos CAPES/NANOBIOTEC, pelo intercâmbio de informações durante este período.

Aos Profs. Gherhardt Ribatski e Sérgio Fontes, e ainda a Anderson Ubices, da EESC-USP, pela disponibilização de espaço físico, equipamentos e pela grande ajuda na realização de testes para o presente estudo.

À minha família, pelo enorme apoio e suporte fornecido nesta caminhada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o curso.

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

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

OLIVEIRA, G.A. **Síntese e caracterização de nanofluidos de prata**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

Este trabalho consiste na síntese e caracterização de nanofluidos, constituídos de nanopartículas de prata dispersas em água. Foram produzidas soluções estáveis de nanopartículas de prata e água destilada, em baixas concentrações, através do método de homogeneização por alta pressão. Também foram produzidos fluidos com nanopartículas de alumina suspensas em água, entretanto para este fluido houve decantação instantânea das nanopartículas. Foram avaliadas a condutividade térmica, através do método do fio quente transiente, e viscosidade, por um reômetro tipo cone-placa. Em comparação com o fluido base, verificou-se um aumento significativo na condutividade térmica em virtude da adição de nanopartículas. Os resultados para a condutividade térmica foram significativamente superiores às correlações disponíveis na literatura para prever esta propriedade, alcançando incrementos de 18% para concentração de 0,3% em volume. Já os resultados para viscosidade apresentaram valores similares a do fluido base. Foi, ainda, realizada uma análise crítica de resultados experimentais da literatura e correlações para previsão destas propriedades em nanofluidos, onde se constatou que grande parte dos resultados observados são contraditórios e não há uma correlação que se ajuste adequadamente aos resultados experimentais encontrados na literatura.

Palavras Chave: *nanofluidos, nanopartícula, condutividade térmica, viscosidade, prata.*

OLIVEIRA, G.A. **Synthesis and characterization of silver nanofluids**. 2012. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Minas Gerais, Brazil.

Abstract

This work concerns the synthesis and characterization of nanofluids consisting of silver nanoparticles dispersed in distilled water as base fluid. Stable solutions were produced at low concentrations, using the method called high-pressure homogenizer. Alumina nanofluid were also produced, however it was observed a fast agglomeration and deposition. The measure of the thermal conductivity was conducted through the transient hot wire method and the viscosity using a cone-plate rheometer. The experimental results for thermal conductivity were significantly higher than the correlations available in the literature to predict this property, however lower than other experimental results obtained in the literature. In relation to the viscosity, the results obtained for silver nanofluids were almost the same found to the base fluid. A critical comparison was also carried out between experimental results and the correlations found in the literature to predict these properties of nanofluids, where demonstrated that the results are contradictory and there wasn't correlation that fitted properly the experimental results.

Key Words: nanofluids, nanoparticle, thermal conductivity, viscosity, silver.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução das publicações envolvendo nanofluidos	3
Figura 2.2: Conteúdo das publicações envolvendo nanofluidos	7
Figura 2.3: Conteúdo das publicações experimentais envolvendo nanofluidos	8
Figura 2.4: Conteúdo das publicações computacionais envolvendo nanofluidos	8
Figura 2.5: Esquema do processo de homogeneização a alta pressão	12
Figura 2.6: Influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (alumina-água).	21
Figura 2.7: Influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (óxido de cobre-água).	22
Figura 2.8: Influência da espessura de nanocamada na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (óxido de titânio-água).	23
Figura 2.9: Influência da espessura de nanocamada na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (alumina-água).	23
Figura 2.10: KD2 Pro Analyzer	24
Figura 3.1: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (30 nm)	37
Figura 3.2: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (36 nm)	37
Figura 3.3: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (36 nm)	38
Figura 3.4: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (43 nm)	39

Figura 3.5: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (43 nm)	40
Figura 3.6: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (47 nm)	40
Figura 3.7: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (45 nm)	41
Figura 3.8: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-etilenoglicol (45 nm)	42
Figura 3.9: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (48 nm)	42
Figura 3.10: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (80 nm)	43
Figura 3.11: Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (150 nm)	44
Figura 3.12: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (8 nm)	45
Figura 3.13: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (50 nm)	45
Figura 3.14: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (29 nm)	46
Figura 3.15: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (33 nm)	47
Figura 3.16: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (21 nm)	48
Figura 3.17: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (25 nm)	48
Figura 3.18: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (40 nm)	49
Figura 3.19: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de zinco-etilenoglicol (50 nm)	50

Figura 3.20: Condutividade térmica para o nanofluido óxido de zinco-etilenoglicol (15 nm)	50
Figura 3.21: Condutividade térmica para o nanofluido carbeto de silício-água (50 nm)	51
Figura 3.22: Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido alumina-água	52
Figura 3.23: Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido óxido de óxido de titânio-água	53
Figura 3.24: Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água	54
Figura 3.25: Resultados experimentais de Jabardo (2012)	55
Figura 3.26: Resultados experimentais de Jabardo (2012)	55
Figura 3.27: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-água (1%) e correlações	57
Figura 3.28: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina esférica-água (1%) e correlações	57
Figura 3.29: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina esférica-água (3%) e correlações	58
Figura 3.30: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-PAO (1%) e correlação de Maxwell (1873)	59
Figura 3.31: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-PAO (3%) e correlação de Maxwell (1873)	59
Figura 3.32: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para ouro-água (0,001%) e correlações	60
Figura 3.33: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para óxido de silício-água (31,1%) e correlações	61
Figura 3.34: Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para Mn-Zn-Ferrita-água (0,17%) e correlações	61

Figura 3.35: Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido alumina – água	62
Figura 3.36: Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido óxido de silício – etanol	63
Figura 3.37: Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido alumina - água	64
Figura 4.1: Nanopartículas de prata da Nanostructured & Amorphous Materials, Inc., de 10 e 80 nm, respectivamente	66
Figura 4.2: Homogeneizador a alta pressão	67
Figura 4.3: Sonda Hukseflux TP-08 (Fonte: Motta, 2012)	70
Figura 4.4: Reômetro utilizados nos experimentos (Fonte: Motta, 2012)	71
Figura 5.1: Amostras de nanofluidos prata-água, para 10 e 80 nm, respectivamente	73
Figura 5.2: Micrografia de nanopartículas de prata: A: presente trabalho (0,1%); B: Kosmala et al. (2011)	75
Figura 5.3: Micrografia de nanopartículas de prata (0,3%)	75
Figura 5.4: Micrografia de nanopartículas de prata (0,3%)	76
Figura 5.5: Amostras de nanofluidos alumina – água.	76
Figura 5.6: Condutividade térmica relativa para os nanofluidos analisados	79
Figura 5.7: Tensão de cisalhamento por taxa de deformação para os nanfluidos com prata 10nm	80
Figura 5.8: Tensão de cisalhamento por taxa de deformação para os nanfluidos com prata 80nm	81

Figura 5.9: Viscosidade dinâmica relativa para os nanofluidos analisados	82
Figura 5.10: Comparação entre a condutividade térmica obtida para os fluidos com nanopartículas de prata 10 nm e modelos da literatura	83
Figura 5.11: Comparação entre a condutividade térmica obtida para os fluidos com nanopartículas de prata 80 nm e modelos da literatura	83
Figura 5.12: Comparação dos resultados de condutividade térmica obtidos com os de Paul et al. (2012)	84
Figura 5.13: Comparação entre correlações e os resultados obtidos para a viscosidade dos nanofluidos	85
Figura B.1: Curva de validação para o modelo de Gao e Zhou (2006)	99
Figura B.2: Curva de validação para o modelo de Leong et al. (2006)	99
Figura B.3: Curva de validação para o modelo de Xie (2005)	100
Figura B.4: Curva de validação para o modelo de Xue (2003)	100
Figura B.5: Curva de validação para o modelo de Xue e Xu (2005)	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Condutividade térmica de alguns materiais	4
Tabela 2.2: Resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos	28
Tabela 2.3: Modelos clássicos de previsão de viscosidade em suspensões sólido-líquido	31
Tabela 2.4: Resultados experimentais da literatura para a viscosidade de nanofluidos	33
Tabela 4.1: Dados das nanopartículas de prata utilizadas	65
Tabela 4.2: Dados das nanopartículas de alumina utilizadas (Fonte: Motta, 2012)	66
Tabela 5.1: Amostras de nanofluidos produzidos com prata 10nm	73
Tabela 5.2: Amostras de nanofluidos produzidos com prata 80nm	74
Tabela 5.3: Condutividade térmica para os nanofluidos de água e prata 10 nm	77
Tabela 5.4: Condutividade térmica para os nanofluidos de água e prata 80 nm	77
Tabela 5.5: Condutividade térmica para o nanofluido de água e prata 80 nm (0,15%) medidos pela UFRJ.	78
Tabela 5.6: Viscosidade dinâmica para os nanofluidos de água e prata 10 nm	79
Tabela 5.7: Viscosidade dinâmica para os nanofluidos de água e prata 80 nm	80
Tabela A.1: Lista de universidades	96

Tabela B.1: Discrepância entre os modelos para condutividade térmica e curvas implementadas	98
--	----

SIMBOLOGIA

Arábicos

A	Área [m ²]
B _{2x}	Fator auxiliar de despolarização na direção x
B _{2y}	Fator auxiliar de despolarização na direção y
C ₁	Constante proporcional de Jang e Choi (2004)
D	Diâmetro [nm]
d	Espessura de amostra [mm]
c _p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg K]
A ₁	Coefficiente relacionado com a concentração de nanopartículas
g	Vetor de grade óptica
H	Distância entre nanopartículas [nm]
h	Espessura de nanocamada [nm]
I	Intensidade do feixe de laser
B ₁	Coefficiente relacionado com a concentração de nanopartículas
K _b	Constante de Boltzmann [J/K]
k	Condutividade térmica [W/m K]
L	Espessura da camada de fluido de teste [mm]
M	Parâmetro auxiliar na determinação da influência da nanocamada
m	Massa [kg]
n	Função de distribuição do raio das nanopartículas
C	Constante de correção de Masoumi et al. (2009)
Q	Fluxo de calor [W/m ²]
q	Calor por unidade de comprimento [W/m]
R	Resistência aquecedora [Ω]
r	Raio das nanopartículas [nm]
r _f	Posição radial da fonte [mm]
t	Tempo [s]
V	Volume [m ³]
v _B	Velocidade browniana [m/s]

V_1	Tensão [V]
b	Meia largura do aquecedor de metal [mm]
Re_d	Número de Reynolds
Pr	Número de Prandtl
\bar{C}	Velocidade de movimento aleatório das nanopartículas [m/s]
C_{geom}	Fator geométrico
\dot{q}''	Fluxo de calor por unidade de área [W/m ²]
\vec{k}	Vetor de malha dinâmica

Gregos

α	Difusividade térmica [W/m K]
β	Razão entre espessura de nanocamada e raio de nanopartículas
ψ	Fator de forma
θ	Parâmetro auxiliar na determinação da influência da nanocamada
ε	Razão entre as condutividades térmicas de nanopartícula e fluido base
δ	Gradiente
ω	Frequência angular [rad/s]
ΔT	Variação de temperatura [K]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
λ	Fator de forma
Φ	Concentração volumétrica
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
α_2	Parâmetro de forma de Xue e Xu (2005)
β_2	Constante relacionada a resistência de Kapitza
β_{fl}	Parâmetro de interface líquido-nanocamada
B_{pl}	Parâmetro de interface partícula-nanocamada
β_{if}	Parâmetro de interface nanocamada-líquido
Φ_t	Concentração de nanocamada
Φ_a	Concentração de aglomerações
Φ_{int}	Concentração de nanopartículas dentro da aglomeração

α_3 Absortividade do feixe de laser

Subscritos

eff	efetiva
nf	nanofluido
bf	fluido base
p	partículas
cx	Direção x
lr	nanocamada
2x	Direção x de semi-eixo da elipse
2y	Direção y de semi-eixo da elipse
cl	cluster
nano	nanométrico
int	interno
geom	geométrico
inf	Inferior
sup	superior
cy	Direção y

Siglas

AOT	dioctyl sodium sulfocinate
CHF	Fluxo Crítico de Calor
CNT	Nanotubos de carbono
CTAB	Cetyl trimethyl ammonium bromide
CVD	Chemical vapor deposition
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
HMT	Hexamina
KD2	Equipamento para medir a condutividade térmica
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
PAO	Poly-alpha-olefin

PVA	polyvinyl alcohol
MWNT	Multi Walled Carbon Nanotubes
SWNT	Single Walled Carbon Nanotubes
THW	Transient hot wire
TSHW	Transient short hot wire
USP	Universidade de São Paulo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
SDS	surfate dodecyl sodium
SANSS	Submerged arc nanoparticle synthesis system

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organização do texto	2
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Nanofluidos	3
2.2 Aplicações dos nanofluidos	4
2.3 Banco de artigos de nanofluidos	6
2.4 Síntese de nanofluidos	8
2.4.1 Métodos de um passo	9
2.4.2 Métodos de Dois passos	10
2.4.3 Síntese de nanofluidos baseados em nanopartículas de prata	12
2.5 Condutividade Térmica de Nanofluidos	13
2.5.1 Modelos teóricos para a condutividade térmica de nanofluidos	15
2.5.2 Métodos de medição da condutividade térmica	24
2.5.3 Resultados experimentais para a condutividade térmica de nanofluidos	28
2.6 Viscosidade de Nanofluidos	31
2.6.1 Modelos para previsão da viscosidade	31
2.6.2 Métodos de medição de viscosidade	33
2.6.3 Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos	33
CAPÍTULO III - ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LITERATURA	35
3.1 Introdução	35
3.2 Condutividade térmica	36
3.2.1 Comparações entre modelos e resultados experimentais da literatura	36
3.2.2 Comparação entre resultados experimentais por tipo de nanofluido	52
3.2.3 Medição da condutividade térmica por diferentes instituições	56
3.3 Viscosidade	62
CAPÍTULO IV - PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFLUIDOS	65
4.1 Materiais	65
4.1.1 Nanopartículas	65

4.1.2 Homogeneizador a alta pressão.....	66
4.2 Determinação da massa de nanopartículas e fluido base	67
4.3 Procedimento experimental	68
4.3.1 Preparação dos nanofluidos.....	68
4.3.2 Medição da condutividade térmica	69
4.3.3 Medição da viscosidade	70
CAPÍTULO V - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	72
5.1 Introdução	72
5.2 Estabilidade.....	72
5.3 Condutividade Térmica	77
5.4 Viscosidade.....	79
5.5 Comparações com dados da literatura	82
5.5.1 Condutividade térmica.....	82
5.5.2 Viscosidade	84
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	86
6.1 Conclusões	86
6.2 Trabalhos Futuros.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE A - UNIVERSIDADES PARTICIPANTES DO ESTUDO DE REFERÊNCIA DE BUONGIORNO ET AL. (2009).....	96
APÊNDICE B - VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA SIMULADOS	98

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O avanço das inovações tecnológicas constitui um grande desafio para a área de refrigeração. Nos novos componentes de equipamentos, a geração de calor tem se mostrado elevada, e um resfriamento adequado destes componentes é necessária. Em sistemas térmicos, as melhorias ocorrem essencialmente em equipamentos e materiais. Nesse contexto, a busca de fluidos com propriedades térmicas superiores tornou-se indispensável na melhoria da eficiência energética em sistemas térmicos.

Nanofluidos são dispersões de partículas de escala nanométrica (1 a 100nm) em fluidos comuns, denominados fluidos base. Os principais tipos de nanopartículas são: metais estáveis (ouro, prata, cobre, etc.), óxidos metálicos (alumina, óxido de cobre, óxido de titânio, etc.), carbono em diversas formas (grafite, diamante, nanotubos de carbono), óxidos cerâmicos (óxido de silício). Por sua vez, os principais fluidos base utilizados são água, etilenoglicol e fluidos refrigerantes comuns.

Os nanofluidos possuem condutividade térmica muito superior a dos fluidos base, por isso podem substituir os refrigerantes utilizados em diversos segmentos da engenharia.

1.2 Objetivos

Esta dissertação apresenta como objetivo principal o desenvolvimento de uma técnica ideal para a síntese de nanofluidos a base de prata e água, além da caracterização das propriedades destes fluidos.

Objetivos específicos:

- Comparações entre modelos e resultados experimentais da literatura para condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos;
- Avaliação da estabilidade dos nanofluidos produzidos;
- Determinação da condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos produzidos, e comparação com dados teóricos e experimentais da literatura.

1.3 Organização do texto

O presente trabalho está estruturado de seguinte maneira:

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica levantada sobre publicações onde se estudaram características de nanofluidos, incluindo síntese, aplicações de nanofluidos, condutividade térmica e viscosidade a nível teórico e experimental.

O capítulo III apresenta uma extensa e crítica comparação entre resultados experimentais e correlações da literatura para a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos, tendo em vista observar a concordância entre resultados experimentais e modelos da literatura.

No Capítulo IV é descrita a metodologia para produção de nanofluidos utilizando o processo de homogeneização a alta pressão, além dos métodos de medição da condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos produzidos.

O Capítulo V apresenta os nanofluidos obtidos pelo processo de homogeneização, incluindo micrografias da estrutura obtida e condutividade térmica e viscosidade das amostras.

O Capítulo VI apresenta as conclusões desta dissertação e trabalhos futuros a serem desenvolvidos nesta linha de pesquisa.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nanofluidos

O termo nanofluidos foi introduzido por Choi (1995) para denominar as suspensões coloidais, em escala nanométrica (1 a 100nm), de sólidos em líquidos. Devido à elevada condutividade térmica das nanopartículas, os nanofluidos possuem uma condutividade térmica também superior em relação a seus respectivos fluidos base, ou seja, os nanofluidos possuem um grande potencial de transferência de calor, tanto em escoamento monofásico como em mudança de fase. Os nanofluidos também têm potencial em incrementar o fluxo crítico de calor, com uma diminuição pequena na transferência de calor, resultando em mais uma gama de aplicações, principalmente nuclear. Este potencial despertou o interesse da comunidade científica nesta nova classe de fluidos. A Fig. 2.1 mostra a quantidade de publicações envolvendo nanofluidos nos últimos anos. A Tab. 2.1 ilustra como a condutividade térmica dos sólidos utilizados como nanopartículas é superior à condutividade de fluidos refrigerantes e óleos.

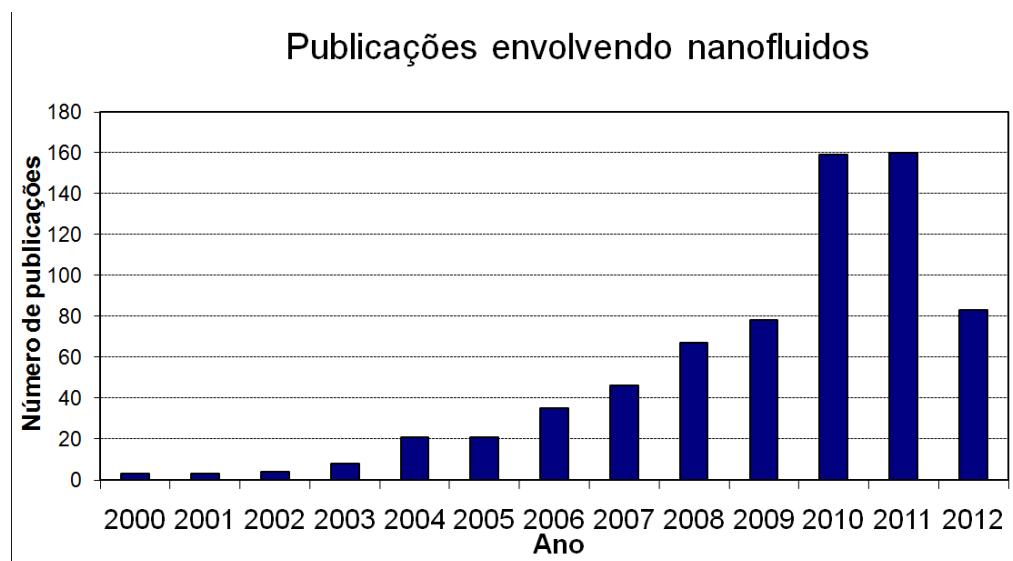


Figura 2.1 – Evolução das publicações envolvendo nanofluidos

Tabela 2.1: Condutividade térmica de alguns materiais

Sólidos		Líquidos	
Material	k (W/m-K)	Material	k (W/m-K)
Nanotubos de Carbono (CNT)	3000	Água	0,613
Prata (Ag)	426	Etilenoglicol	0,253
Ouro (Au)	317	Propilenoglicol	0,182
Óxido de Cobre (CuO)	69	Óleo de Motor	0,145
Alumina (Al ₂ O ₃)	40	“Poly-Alpha-Olefin” (PAO)	0,142
Óxido de Titânio (TiO ₂)	13,7	Etanol	0,18
Óxido de Silício (SiO ₂)	1,4	Amônia	0,5
Óxido de Zinco	116	R12	0,07
Carbeto de Silício	490	Querosene	0,15

Por outro lado, a viscosidade dos nanofluidos também é elevada, o que resulta em um problema no processo de transferência de calor, visto que será necessária uma maior potência de bombeamento para manter a velocidade do fluido em um dado escoamento. Além disso, nanofluidos não são mantidos estáveis com facilidade. A homogeneidade e estabilidade dos nanofluidos deve ser controlada para sua implementação em sistemas térmicos em escala industrial.

O estudo da condutividade térmica e da viscosidade dos nanofluidos é fundamental para determinar as possíveis aplicações. Nesse sentido, diversos pesquisadores têm medido estas propriedades e também tentado desenvolver correlações para prever estas propriedades, principalmente para a condutividade térmica. Porém, os dados experimentais dos diversos autores se apresentam muitas vezes contraditórios e discrepantes com relação aos modelos desenvolvidos.

2.2 Aplicações dos nanofluidos

Obter um fluido com condutividade térmica superior a do fluido base, e com capacidade de incrementar o fluxo de calor crítico, implica em um potencial térmico com vasta possibilidade de aplicações em transferência de calor. Algumas delas estão relacionadas a seguir.

Nanofluidos podem ser utilizados em aplicações de transferência de calor, em sistemas de refrigeração, reduzindo o consumo de energia. Como possuem maior capacidade de troca térmica, os equipamentos podem ser utilizados em potências reduzidas, mantendo o mesmo nível de refrigeração. Esta redução pode chegar a 1 trilhão de BTU de energia, para a indústria dos EUA, por exemplo (Routbort, 2009). A utilização de

menos potência promove também uma redução de 5,6 milhões de toneladas métricas na emissão de dióxido de carbono, 21 mil toneladas de dióxido de enxofre e 8,6 mil toneladas de óxidos de nitrogênio, além de diminuir a quantidade de fluido utilizados nos sistemas. Alguns nanofluidos também podem ser usados como fluidos inteligentes, controlando o fluxo de calor. Pode ser configurado em um estado onde conduz mal o calor, ou um estado de alta condutividade, onde a condução se torna mais eficiente (Donzelli et al., 2009).

Reatores nucleares podem ter seu desempenho melhorado com a utilização de nanofluidos, por exemplo melhorar a qualidade do fluido de pressurização do reator, pois utilizando nanofluidos ao invés de água, o aumento da molhabilidade do fluido proporciona aumento do fluxo crítico de calor (CHF), que é o limitante na geração de vapor (Kim et. al., 2007). Os nanofluidos mostram grande potencial em aumentar o CHF, com uma diminuição reduzida na transferência de calor (Jackson, 2007). Porém é necessário conhecer a quantidade de nanopartículas que seriam levadas pelo vapor de ebulição, além da compatibilidade do nanofluido com os componentes dos reatores. Medidas adicionais de segurança devem ser adotadas quando da eliminação do nanofluido. Também podem ser utilizados em sistemas de arrefecimento de emergência, onde podem resfriar superfícies mais rapidamente. Além disso, podem ser fluidos mais seguros, mantendo o combustível derretido dentro do vaso do reator e removendo o calor através da parede do vaso, fato que é limitado pelo fluxo crítico de calor (CHF) no vaso, e os nanofluidos podem aumentar este CHF.

No setor automotivo, nanofluidos apresentam enorme potencial. Os óleos de motor possuem propriedades térmicas muito pobres, podendo se beneficiar da alta condutividade térmica que os nanofluidos podem proporcionar. O uso de nanofluidos permitiria menor tamanho e melhor posicionamento dos radiadores, e menos energia seria gasta para vencer o arrasto aerodinâmico, Além disso, o motor poderia operar em maiores temperaturas, permitindo maior potência sem extrapolar limites de emissão de gases.

A redução na área frontal do radiador pode chegar a 10%, e o consumo de combustível pode diminuir 5%, valor que pode aumentar (Singh et al., 2006). Deve ser analisada, em contrapartida, a possibilidade de erosão das paredes do radiador, para que evite a sua falha.

Combustíveis podem ser melhorados se misturados com nanofluidos, aumentando o calor de combustão total e diminuindo a emissão de óxido nitroso. Nanofluido de alumínio em água pode ser um exemplo de aditivo em combustíveis (Wen, 2010).

Os fluidos de freio também podem ser substituídos por nanofluidos. A energia cinética gerada por uma frenagem é dissipada na forma de calor pelo fluido de freio. Se o fluido atinge o ponto de ebulição, ocorre um bloqueio de vapor, que retarda a dissipação do calor, gerando um risco de segurança. Nanofluidos poderiam substituir os fluidos de freio e aumentar a segurança dos sistemas de frenagem.

Na eletrônica, nanofluidos podem resolver o problema da necessidade de elevada dissipação de calor nos microchips. Podem também ser usados para refrigerar processadores de computador. Nanofluidos mostram potencial para dissipar as grandes quantidades de calor que devem ser produzidas por novos componentes, e espera-se uma nova geração de dispositivos de refrigeração (Ma, et al., 2006).

As aplicações dos nanofluidos não se limitam a engenharia. Na biomedicina também apresentam uma gama de aplicações. No interesse de controlar as respostas das células alvo aos estímulos farmacêuticos, nanofluidos podem ter um papel fundamental. Empregando a nanodistribuição de remédios, a concentração da droga se manterá dentro da janela terapêutica durante o tempo necessário. O problema é a entrega de concentrações uniformes na saída de microcanais (Kleinstreuer et al., 2008). Também existem perspectivas de utilizar nanofluidos no tratamento de câncer, como distribuidores de remédios ou em radioterapia. Nanofluidos magnéticos serão guiados por ímãs através da corrente sanguínea até um tumor, onde altas doses de medicamentos ou radiação seriam liberadas, sem prejudicar os tecidos saudáveis.

A criocirurgia está se tornando um tratamento alternativo ao câncer. Consiste em utilizar o congelamento para destruir tecidos indesejados. A utilização de nanopartículas de alta condutividade térmica como carga adicional pode reduzir a temperatura final, aumentar a taxa de congelamento, ampliar o volume de gelo, além de tornar o tratamento mais flexível, interferindo no tamanho, forma e sentido de formação do gelo, podendo oferecer novas oportunidades de tratamento de tumores (Yan, 2008).

2.3 Banco de artigos de nanofluidos

O banco de artigos do LEST-UFU é fruto de uma extensa pesquisa bibliográfica envolvendo nanofluidos. Os artigos foram buscados em periódicos internacionais, e os anos de publicação são de 2000 a 2012, período em que eclodiram as publicações sobre nanofluidos.

Os artigos foram classificados quanto ao conteúdo, para facilitar a pesquisa bibliográfica. A ordem de prioridade dos temas é convecção, condutividade térmica, viscosidade, transferência de massa e outros. Esta ordem foi adotada devido aos objetivos do grupo de nanofluidos da UFU, que é estudar transferência de calor em escoamento monofásico utilizando nanofluidos. Assim, se um artigo contempla mais de um tema, ele deve ser procurado pelo tema prioritário.

A Fig. 2.2 mostra o conteúdo das publicações envolvendo nanofluidos, de acordo com a classificação do banco de artigos. Pode ser observado que o principal foco das pesquisas envolvendo nanofluidos tem como objetivo avaliar a transferência de calor por convecção. As propriedades térmicas também são muito estudadas, visto que é necessário determiná-las para estimar o coeficiente de transferência de calor.

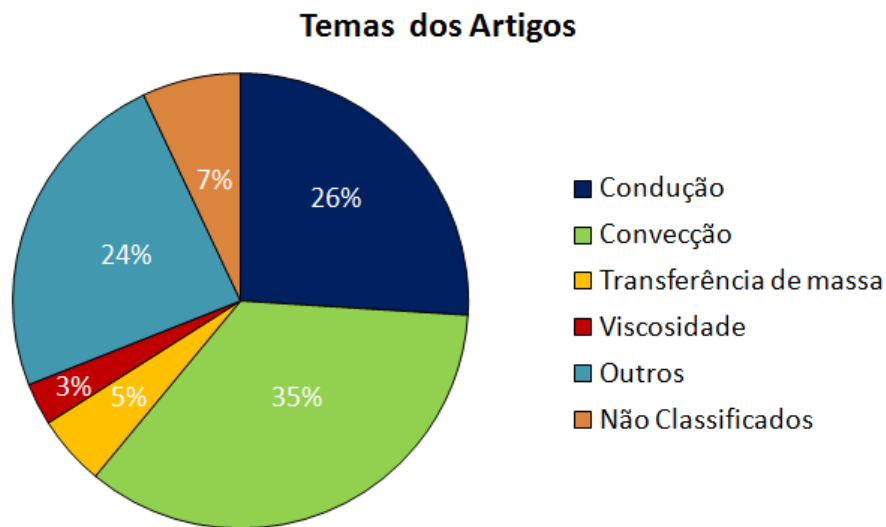


Figura 2.2 – Conteúdo das publicações envolvendo nanofluidos.

O banco de artigos ainda é dividido em dois subgrupos, experimental e computacional. No grupo experimental encontram-se os artigos onde foram avaliadas as propriedades térmicas e transferência de calor a nível experimental. No grupo computacional encontram-se os artigos que abordam simulações numéricas de diversas naturezas sobre nanofluidos, além de estudos paramétricos e desenvolvimento de correlações para propriedades dos nanofluidos. Para facilitar a busca de acordo com os interesses do LEST-UFU, o grupo experimental foi considerado como prioritário na

classificação. As Figs. 2.3 e 2.4 mostram o conteúdo das publicações experimentais e computacionais envolvendo nanofluidos

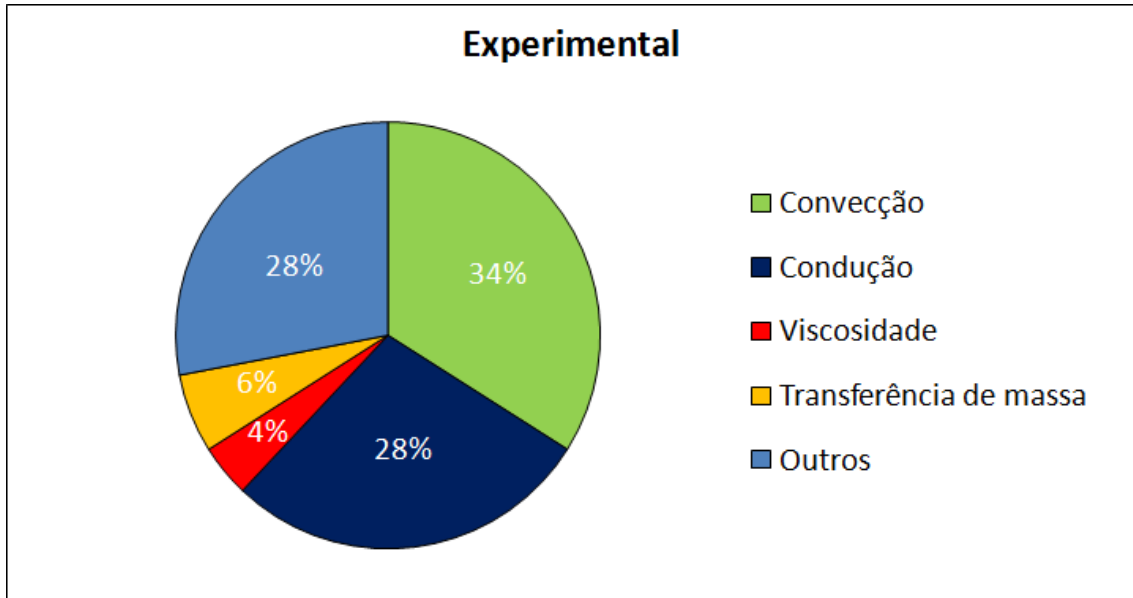


Figura 2.3 – Conteúdo das publicações experimentais envolvendo nanofluidos.

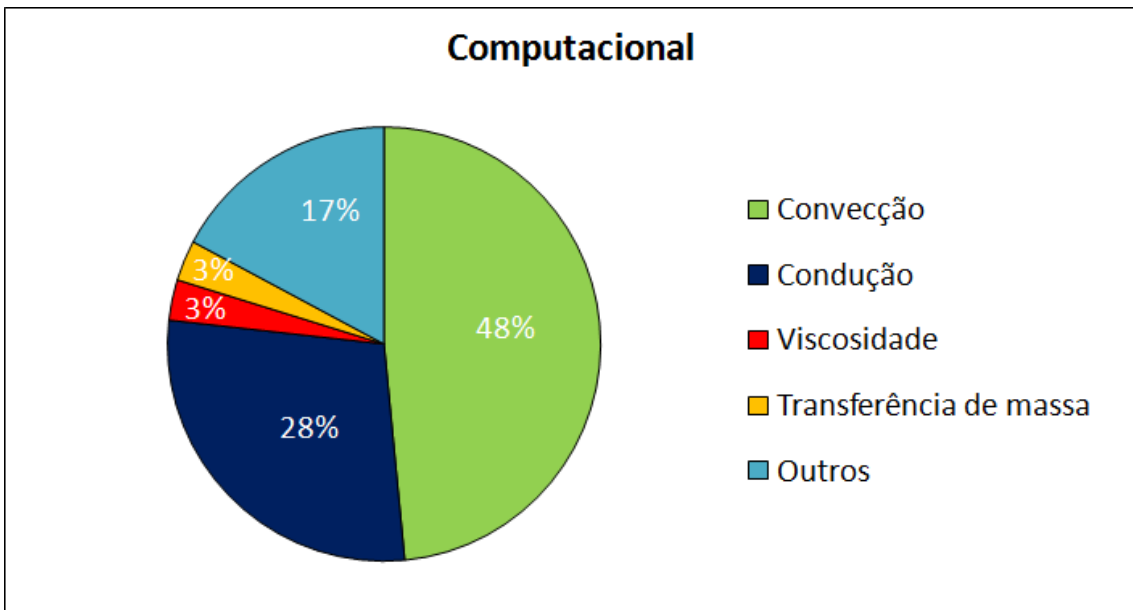


Figura 2.4 – Conteúdo das publicações computacionais envolvendo nanofluidos

2.4 Síntese de nanofluidos

Os nanofluidos são mais estáveis quando comparados com suspensões micrométricas. Ainda assim, existe uma grande dificuldade na obtenção de nanofluidos

estáveis, dada a grande chance de formação de aglomerações ou “clusters” e deposição de nanopartículas. Por isso, a síntese dos nanofluidos é um fator muito importante a ser analisado, já que a estabilidade é sensivelmente dependente do método de preparação

Uma das formas de evitar aglomerações é a adição de dispersantes (ou surfactantes) à mistura. Estas substâncias diminuem a tensão interfacial entre o fluido base e as nanopartículas, fato que as mantém dispersas por mais tempo. Entretanto, alteram as propriedades térmicas da mistura, sendo, na maioria dos casos, indesejável. Exemplos de surfactantes são o CTAB (cetyl trymetil ammonium bromide), SDS (surfate dodecyl sodium), PVA (polyvinyl alcohol), entre outros.

Existem dois tipos de métodos de síntese de nanofluidos: os métodos de um passo e de dois passos. O primeiro consiste naqueles que combinam a síntese das nanopartículas e dispersão no fluido base em um único passo, geralmente com a evaporação das nanopartículas em condições de vácuo e posterior condensação já no fluido base. Estas técnicas reduzem os efeitos de aglomeração de nanopartículas, porém a um elevado custo operacional.

Os métodos de dois passos consistem na síntese de nanopartículas em pó seco e posterior dispersão no fluido base por meio de um processo físico. As vantagens deste método são a possibilidade de obtenção de fluidos de diversas naturezas, visto que diversos fluidos base podem ser utilizados para um mesmo tipo de nanopartícula, além de um custo inferior, facilitando a produção em escala industrial. Por outro lado, a probabilidade de ocorrência de aglomerações torna-se muito maior.

2.4.1 Métodos de um passo

Nos métodos de um passo, as nanopartículas são produzidas e dispersas em meio ao fluido base em um único processo.

Keblinski et al. (2002) utilizaram um método físico de um passo para preparação de nanofluidos. Vapor de cobre foi diretamente condensado em forma de nanopartículas e posto em contato com etilenoglicol escoando a baixa pressão, dentro de uma câmara de vácuo. A mistura final mostrou-se homogênea, e com condutividade térmica significativamente superior a do etilenoglicol

Kao et al. (2007) produziram nanofluidos de óxido de cobre em fluido de freio em um único passo, através do método do arco submerso (SANSS). Uma barra de cobre puro foi utilizada como eletrodo e foi derretida e vaporizada em um fluido dielétrico (DOT3). Após a

haste atingir um estado vaporizado e coagular para o fluido de freio, o nanofluido pronto foi extraído. O cobre reagiu com o oxigênio do fluido base para formar as nanopartículas de óxido de cobre, já dispersas no fluido. Para uma concentração mássica de 2% foi verificado um aumento da condutividade de 0,03 para 0,05 W/m K.

Chen (2010) também utilizou o método do arco submerso para a produção de nanopartículas de óxido de titânio baseados em água. Um bastão de titânio puro foi exposto a um arco submerso sob um ambiente de vácuo controlado, fundido e evaporado. Após esta etapa, o metal passou por um processo de nucleação, condensação e crescimento. Ao invés de nanopartículas de titânio, foram formadas partículas de TiO_2 , devido à reação do oxigênio presente na água e no ar com o titânio. A intensidade da corrente elétrica utilizada no processo influenciou significativamente o tamanho, distribuição e esfericidade das nanopartículas.

A desvantagem dos métodos de um passo é que estes precisam ser desenvolvidos por lotes, ou seja, normalmente a produção acontece apenas em pequenas quantidades, inviabilizando a produção comercial de nanofluidos. Além disso, o controle sobre parâmetros importantes, como tamanho das nanopartículas, é limitado. Outra restrição é que o fluido base deve possuir baixa pressão de vapor, a fim de se evitar aglomerações de nanopartículas (Chaupis, 2011).

2.4.2 Métodos de Dois passos

Nos métodos de dois passos, as nanopartículas são sintetizadas na forma de pó seco ultrafino e posteriormente dispersas no fluido base mediante processos físicos.

2.4.2.1 Síntese de nanopartículas

Condensação de gás inerte: neste método, o material base é vaporizado em uma câmara de vácuo e em seguida condensa este vapor em nanopartículas por colisão com um fluxo de gás inerte a uma pressão controlada.

Sol-Gel: Neste método o sol (solução) evolui no sentido de formar um sistema bifásico de gel contendo tanto a fase líquida quanto a fase sólida. No caso de colóides, como os nanofluidos, uma parcela significativa do fluido pode precisar ser removido para o gel ser identificado. As fases são separadas posteriormente, isto pode ser feito de diversas maneiras, como a centrifugação. Lu e Zhao (2010) produziram nanopartículas de ZnO a partir de uma solução aquosa de hidrato de nitrato de zinco ($Zn(NO_3)_2 \cdot xH_2O$). Este método

inicialmente propõe a ebulição de uma solução etanólica de acetato de zinco dihidratado para formar o precursor do zinco (Spanhel, 1991). O hidrato foi dissolvido em água, formando uma solução de concentração molar 0,1M (0,1 mol de soluto para 1 litro de solução), enquanto HMT ($C_6H_{12}N_4$) foi dissolvido em água formando uma solução de 0,5 a 2,0M. Ambas as soluções foram agitadas por uma haste magnética, depois misturadas e guardadas em forno por 45min, sem agitação. O precipitado formado foi seco e, posteriormente, aquecido, obtendo as nanopartículas de ZnO, que foram dispersas em água.

Deposição de vapor químico (CVD): método usado para produzir materiais sólidos de alta pureza e desempenho. Nele, um substrato é exposto a um ou mais precursores de voláteis, os quais reagem ou se decompõem sobre a superfície do substrato, produzindo o depósito pretendido. O material depositado pode ser de várias formas (policristalino, monocristalino, amorfo, epitaxial). Estes materiais incluem silício, fibras de carbono, nanotubos de carbono, tungstênio, nitreto de silício, etc.

Bouanis et al. (2011) produziram nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) a partir de um processo CVD assistido por um filamento quente, utilizando como catalisador nanopartículas de rutênio em um substrato de crescimento SiO_2/Si . Os resultados experimentais indicaram uma influência significativa de filamento quente e da temperatura de crescimento de grão no diâmetro e na cristalinidade dos SWCNT. Verificou-se que uma maior densidade de SWCNT mais longos foi obtida com a ajuda de filamento quente, enquanto que o diâmetro SWCNT aumentou com o incremento da temperatura de crescimento de grão.

A principal vantagem dos métodos de dois passos é a variedade de nanofluidos que se pode obter, com diversos materiais e tamanhos de nanopartículas, que podem ser dispersas em uma variedade de fluidos base. Conforme mencionado anteriormente, o custo é substancialmente menor que nos métodos de um passo.

Por outro lado, é alta a probabilidade de oxidação e aglomeração das nanopartículas, em qualquer das etapas do processo, fato que impõe uma barreira tecnológica para a produção de fluidos por estes métodos.

2.4.2.2 Dispersão das nanopartículas no fluido base

Banho ultra-sônico e sonicação: são métodos semelhantes, onde o efeito de uma vibração a baixa frequência (da ordem de 10 kHz) é transferido à mistura. No banho ultra-

sônico, esse efeito é transmitido pela água ou fluido do banho. Na sonicação, a vibração é transmitida diretamente pela ferramenta do sonotrodo. Chandrasekar et al. (2010) prepararam nanofluidos de óxido de alumínio baseados em água, utilizando um vibrador ultra-sônico, com pulsos de 100 W a uma frequência de 36 kHz. O tempo de vibração foi de 6h, para garantir a dispersão estável sem a necessidade do uso de surfactantes ou mudança de pH.

Homogeneização a alta pressão: este método consiste em pressurizar a amostra fornecendo assim a energia necessária para quebrar as aglomerações, dispersando, dessa maneira, as nanopartículas no fluido base. Primeiramente, a dispersão contendo aglomerações é inserida no equipamento no qual é pressurizada por um pistão. Nesta etapa, energia é fornecida ao fluido fazendo com que aglomerações sejam quebradas. Os fluxos divididos são recombinados em uma câmara de reação, situada após a seção de medição de pressão. Nesta câmara, a velocidade do fluido pressurizado é aumentada. As aglomerações são quebradas pela combinação de mecanismos: Impactos fortes e irregulares com a parede interior da câmara de interação, microbolhas formadas por implosão de energia de cavitação induzida, e alta taxa de cisalhamento do fluxo. O processo resulta em um fluido disperso e homogêneo. O esquema do processo é mostrado na Fig 2.5.

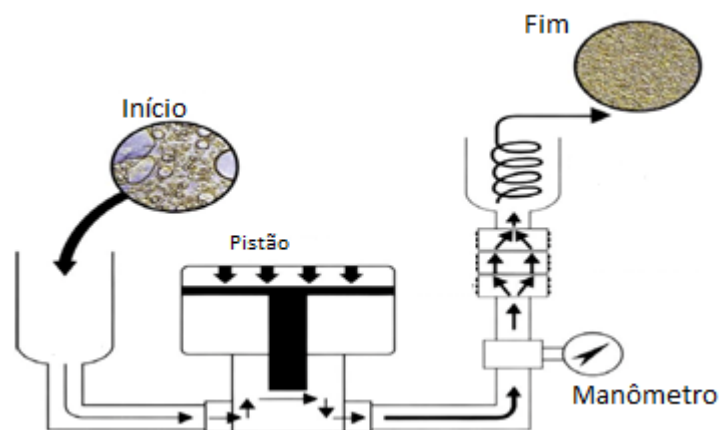


Figura 2.5 – Esquema do processo de homogeneização a alta pressão.

2.4.3 Síntese de nanofluidos baseados em nanopartículas de prata

Nanopartículas de prata foram utilizadas neste trabalho na preparação de nanofluidos. Metais estáveis, em geral não se dispersam facilmente em diversos fluidos, devido à sua não afinidade com estes fluidos. Este fato torna relevante fazer um levantamento dos métodos usados para a produção de nanofluidos com prata.

Kang et al. (2006) produziram nanofluidos de prata em água por um processo de dois passos. As nanopartículas foram produzidas por deposição química de vapor catalítica, com tamanho 35 nm. A mistura foi preparada utilizando um homogeneizador ultra-sônico, e não foi utilizado surfactante. O desempenho do nanofluido em tubos de calor foi comparado com outro onde as nanopartículas eram de 10 nm, e a resistência térmica se mostrou dependente do tamanho das nanopartículas.

Tamjid e Guenther (2010) analisaram a estrutura coloidal de nanofluidos de prata em dietilenoglicol. O nanofluido foi sintetizado pelo “sputtering on running liquid”, e não foi utilizado surfactante. Este método de um passo consiste em uma pulverização catódica a alta pressão para evaporar líquidos com baixa pressão de vapor, produzindo dispersões estáveis (Wagener e Gunther, 1999). Os nanofluidos produzidos se apresentaram peculiarmente floculados, ou seja, com aglomerações espalhadas ao longo do fluido, e foi observado comportamento reológico pseudoplástico.

Kosmala et al. (2011) produziram nanopartículas de prata de 50 nm através de um simples método de química úmida. Nitrato de prata foi utilizado como precursor, e surfactante “dioctyl sodium sulfocinate” (AOT) foi utilizado. Duas soluções com estes materiais foram feitas separadamente, e depois misturadas e o produto final agitado. As partículas obtidas foram dispersas em uma solução aquosa e o líquido submetido a ondas de choque, a uma frequência de 75 Hz e picos de intensidade de 80 MPa, durante 10 a 90 minutos. Sonicação foi necessária para quebrar as aglomerações.

Paul et al. (2012) sintetizaram nanofluidos de prata em água utilizando um método químico de um passo, denominado “wet chemical bottom up”. Primeiro, uma concentração específica da solução precursora (nitrato de prata, AgNO_3) foi evaporada e posteriormente solução de citrato de sódio (“tri-sodium citrate) foi adicionada mediante vigorosa agitação. O calor foi fornecido por cerca de 1 hora, até que a redução fosse completa. A concentração foi variada mediante alteração na concentração da solução precursora.

2.5 Condutividade Térmica de Nanofluidos

A alta condutividade térmica é a principal característica dos nanofluidos e implica em aplicações em transferência de calor para esta classe de fluidos. Esta propriedade tem sido

alvo de estudo por diversos autores, tanto a nível teórico quanto experimental e algumas teorias elaboradas para descrever tendências para a condutividade térmica de nanofluidos.

Existem 8 fatores principais que influenciam a condutividade térmica dos nanofluidos:

- Concentração de nanopartículas: quanto maior a concentração, maior será a condutividade térmica do nanofluido;
- Natureza das nanopartículas e do fluido base: suas condutividades térmicas e sua interação têm influência direta na condutividade térmica do nanofluido.;
- Tamanho e forma das nanopartículas: quanto menores as nanopartículas, maior o incremento na condutividade térmica (para uma dada concentração), e quanto mais alongadas as nanopartículas, maior será a condutividade térmica das mesmas, e conseqüentemente, do nanofluido;
- Temperatura: quanto maior a temperatura, maior o incremento na condutividade proporcionado pelas nanopartículas ao fluido base;
- Aditivos: A presença de aditivos que tem por objetivo elevar a estabilidade dos nanofluidos também influencia a condutividade térmica do nanofluido;
- Acidez: Quanto mais ácido o nanofluido, ou menor o seu pH, maior será sua condutividade, ou seja, maior o incremento de condutividade devido às nanopartículas;

Alguns autores, ainda, descrevem o fenômeno do aumento da condutividade térmica como também resultante de outros fatores:

- Nanocamada: Descrita como uma camada interfacial entre as nanopartículas e o fluido base, é tratada como determinante na condutividade térmica dos nanofluidos. A nanocamada possui uma condutividade intermediária entre o fluido base e as nanopartículas, e, portanto, quanto maior sua espessura e condutividade, maior será a condutividade do nanofluido. Estas características, por sua vez, dependem da natureza da interação fluido-partícula.
- Movimento Browniano: É um movimento aleatório, que desloca as nanopartículas pelo fluido base, aumentando a probabilidade de colisão entre elas. Existem alguns estudos visando estimar a influência do movimento browniano nas propriedades dos nanofluidos, uma vez sabendo que a influência, mesmo que em alguns casos desprezível quanto ao deslocamento de partículas, está diretamente relacionado à presença de aglomerações.

- Aglomerações: A presença e quantidade de aglomerações têm influência nas propriedades dos nanofluidos, inclusive pelo fato de que aglomerações são indícios de não-homogeneidade do fluido.
- Potencial interparticular: Considerado por muitos como um fator importante nas propriedades dos nanofluidos, depende da natureza das nanopartículas assim como da concentração.

2.5.1 Modelos teóricos para a condutividade térmica de nanofluidos

Diversos modelos foram desenvolvidos nos últimos anos para determinar a condutividade térmica de nanofluidos. Alguns modelos clássicos para a condutividade térmica de misturas são também, frequentemente, utilizados para estimar esta propriedade. A maioria dos modelos desenvolvidos para a condutividade térmica de nanofluidos são baseados em modelos clássicos para a condutividade de misturas como o de Maxwell (1873) e Hamilton-Crosser (1962). Para todos os modelos foi considerada a condutividade efetiva dos nanofluidos, que é um parâmetro relativo, como mostra a equação 2.1:

$$k_{eff} = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \quad (2.1)$$

Onde k_{eff} , k_{nf} e k_{bf} representam a condutividade térmica efetiva, do nanofluido e do fluido base, respectivamente.

O modelo de Maxwell (1873) foi desenvolvido com base na teoria do potencial para prever a condutividade de misturas de partículas micro e milimétricas e fluidos, para baixas concentrações. As partículas são consideradas esféricas e o meio estatisticamente homogêneo. A eq. 2.2 representa o modelo de Maxwell:

$$k_{eff} = k_{bf} + 3\phi \left(\frac{k_p - k_{bf}}{2k_{bf} + k_p - \phi \cdot (k_p - k_{bf})} \right) \cdot k_{bf} \quad (2.2)$$

Onde ϕ é a concentração volumétrica de nanopartículas.

Hamilton e Crosser (1962) propuseram uma modificação no modelo de Maxwell, introduzindo um fator empírico de forma ψ . A previsão era que para partículas não esféricas, o incremento seria maior do que para partículas esféricas. O fator de forma deveria ser obtido empiricamente, para a obtenção da condutividade segundo a equação 2.3:

$$k_{nf} = k_{bf} + 3\psi^{-1}\phi \frac{k_p - k_{bf}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{bf} + k_p - \phi(k_p - k_{bf})} k_{bf} \quad (2.3)$$

A partir destes modelos, alguns pesquisadores recentes implementaram novas considerações para melhor prever a condutividade térmica de nanofluidos. A maioria dos modelos propostos são para nanopartículas esféricas.

As variáveis que foram analisadas são as condutividades do fluido base e das nanopartículas, a concentração volumétrica de nanopartículas, a espessura e condutividade da nanocamada, assim como o tamanho das nanopartículas.

Yu e Choi (2003) desenvolveram um novo modelo, modificando a equação de Maxwell, para a condutividade térmica de suspensões sólido-líquido, incluindo como novo fator a presença de nanocamada. Devido a esta interface, o maior impacto na condutividade térmica ocorre para pequenos tamanhos de nanopartículas (menores que 10nm). Este modelo está expresso na Eq. 7, onde se pode notar a influência da espessura de nanocamada. Para maiores diâmetros da nanopartícula, a influência da nanocamada se torna menor, aproximando a correlação ao modelo de Maxwell.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_{bf} + (2 \cdot (k_p - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3) \cdot \phi}{k_p + 2k_{bf} - ((k_p - k_{bf}) \cdot (1 + \beta)^3) \cdot \phi} \quad (2.4)$$

Onde $\beta = \frac{h}{r}$, r representa o raio das nanopartículas e h a espessura de nanocamada.

Um fator empírico generalizado associado a um modelo modificado de Hamilton-Crosser é proposto para mostrar a importância que as interfaces sólido/líquido têm no aumento da condutividade. Os resultados do modelo de Yu e Choi determinaram que este novo modelo não é viável para prever o comportamento não linear da condutividade térmica do nanofluido quando a condutividade da nanocamada é muito superior a do fluido, ou quando a substância é ternária.

Baseado na teoria de Maxwell e na teoria de polarização média, Xue (2003) apresenta um modelo para determinar a condutividade térmica efetiva de nanofluidos, considerando o conjunto partícula-nanocamada como uma partícula complexa. A partícula é considerada na forma elíptica, de semi-eixos a,b,c. Neste modelo, B_{2x} é um parâmetro de forma, que vale 1/3 para partículas esféricas. Xue (2003) comparou seu modelo com alguns resultados experimentais, inclusive para partículas de nanotubos de carbono. Neste caso, estimou B_{2x}

como igual a 0,0062 para o diâmetro e comprimento analisado. Nas equações, λ é um fator de forma e B um parâmetro auxiliar de forma.

$$9\left(1 - \frac{\phi}{\lambda}\right)\left(\frac{k_{nf} - k_{bf}}{2k_{nf} + k_{bf}}\right) + \frac{\phi}{\lambda}\left[\frac{k_{nf} - k_{cx}}{k_{nf} + B_{2x} \cdot (k_{cx} - k_{nf})} + 4 \cdot \frac{k_{nf} - k_{cy}}{2k_{nf} + (1 - 2B_{2x}) \cdot (k_{cy} - k_{nf})}\right] = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Onde: } \lambda = \frac{a \cdot b \cdot c}{(a+h)(b+h)(c+h)}; k_{cx} = k_{lr} \left[\frac{(1 - B_{2x}) \cdot k_{lr} + B_{2x} \cdot k_2 + (1 - B_{2x}) \cdot \lambda \cdot (k_p - k_{lr})}{(1 - B_{2x}) \cdot k_{lr} + B_{2x} \cdot k_p - B_{2x} \cdot \lambda \cdot (k_p - k_{lr})} \right];$$

$$k_{cy} = k_{lr} \left[\frac{(1 - B_{2y}) \cdot k_{lr} + B_{2y} \cdot k_2 + (1 - B_{2y}) \cdot \lambda \cdot (k_p - k_{lr})}{(1 - B_{2y}) \cdot k_{lr} + B_{2y} \cdot k_p - B_{2y} \cdot \lambda \cdot (k_p - k_{lr})} \right]; B_{2y} = \frac{1 - B_{2x}}{2}.$$

Wang et al. (2003) desenvolveram um modelo que envolve uma aplicação e melhora das teorias do meio efetivo e fractal, para determinar a condutividade térmica de nanofluidos a base de partículas metálicas e não metálicas, considerando o efeito do tamanho das nanopartículas e da adsorção do líquido na superfície das nanopartículas (nanocamada). O modelo fractal proposto se relaciona diretamente com a interação entre partículas e o processo de formação de clusters. Devido à dificuldade de determinação da condutividade de nanocamada, este parâmetro foi, num primeiro momento, aproximado. Os resultados foram comparados com outros modelos e com resultados experimentais para nanofluidos de CuO em água, obtendo boa aproximação quando considera o efeito da nanocamada, apesar deste parâmetro não ter sido ainda devidamente estudado.

$$k_{eff} = \frac{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_{cl}(r) \cdot n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{bf}}}{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_{bf} \cdot n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{bf}}} \quad (2.6)$$

Onde $n(r)$ é uma função de distribuição do raio das nanopartículas.

Koo e Kleinstreuer (2004) propuseram um modelo, considerando além do efeito do tamanho das nanopartículas e da concentração, o efeito da temperatura na condutividade térmica dos nanofluidos. Este novo modelo se baseou na teoria da energia cinética e foi comparado com diversos resultados experimentais. Baseando-se em resultados experimentais, foi observado que o efeito da temperatura é diferente para diferentes naturezas de nanofluidos. O modelo se mostrou sensivelmente dependente da concentração volumétrica de nanopartículas, visto que, devido ao movimento browniano e a condutividade

térmica variável, o gradiente de temperatura muda significativamente conforme a posição analisada, fato que se acentua em elevadas concentrações.

Jang e Choi (2004) desenvolveram um modelo em que se observou uma elevada dependência do tamanho das nanopartículas. O modelo foi baseado na teoria cinética, onde determinaram que existem basicamente 4 modos de transporte de energia em nanofluidos: colisão entre moléculas de fluido, difusão de nanopartículas nos fluidos, colisão entre nanopartículas devido ao movimento browniano e interações entre nanopartículas com moléculas do fluido base. A partir desta teoria desenvolveram uma equação que leva em consideração o contorno da nanopartícula e compararam com alguns resultados experimentais, obtendo boas aproximações. Nas equações β_2 representa uma constante relacionada a resistência de kapitza, C_1 é uma constante proporcional, como observado na equação 2.7.

$$k_{eff} = k_{bf}(1 - \phi) + k_{nano} \cdot \phi + 3C_1 \frac{D_{bf}}{D_p} \cdot k_{bf} \cdot Re_d^2 \cdot Pr \cdot \phi \quad (2.7)$$

$$\text{Onde: } k_{nano} = \beta_2 \cdot k_p, \quad Re_d = \frac{\bar{C} \cdot D_p}{\nu}$$

Leong et al. (2006) desenvolveram uma correlação considerando a nanocamada como um dos principais mecanismos no aumento da condutividade térmica dos nanofluidos. Considerando a existência da nanocamada, dividiu a determinação da condutividade em duas etapas: cálculo dos campos e gradientes de temperatura e modelagem da condutividade térmica efetiva. Compararam seus resultados com alguns experimentos, e estimaram a condutividade da nanocamada como 3 vezes a do fluido base e com espessura 1nm, para Al₂O₃-água, e para CuO-água a condutividade de nanocamada estimada foi 5 vezes a do fluido base.

$$k_{eff} = \frac{(k_p - k_{lr}) \cdot \phi \cdot k_{lr} \cdot (2\beta_4^3 - \beta_3^3 + 1) + (k_p + 2k_{lr})\beta_4^3 \cdot (\phi \cdot \beta_3^3 \cdot (k_{lr} - k_{bf}) + k_{bf})}{(\beta_4^3 \cdot (k_p + 2k_{lr})) - (k_p - k_{lr}) \cdot \phi \cdot (\beta_4^3 + \beta_3^3 - 1) \cdot k_{bf}} \quad (2.8)$$

$$\text{Onde: } \beta_1 = 1 + \frac{\gamma}{2}; \beta = 1 + \gamma; \gamma = \frac{h}{r}; k_{lr} = 3k_{bf} \text{ (alumina-água)}$$

Xue e Xu (2005) determinaram que a condutividade térmica de nanofluidos não pode ser estimada sem levar em consideração o efeito interfacial entre as nanopartículas e o fluido base e derivaram uma expressão dependente do tamanho das nanopartículas e

propriedades interfaciais, além de considerarem o conjunto nanopartícula-nanocamada como uma partícula complexa. Baseado em resultados experimentais determinaram a espessura e condutividade de nanocamada para os nanofluidos alumina/água, óxido de cobre/água e óxido de cobre/etilenoglicol.

$$\left(1 - \frac{\phi}{\alpha_2}\right) \cdot \left(\frac{k_{nf} - k_{bf}}{2k_{nf} + k_{bf}}\right) + \frac{\phi}{\alpha_2} \cdot \left(\frac{(k_{nf} - k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) - (\alpha_2 \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_{nf}))}{(2k_{nf} + k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) + 2\alpha_2 \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (k_{lr} - k_{nf})}\right) = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{Onde } \alpha_2 = \left(\frac{r}{r+h}\right)^3$$

K_{lr} é a condutividade da nanocamada (constante e igual a 5), h a espessura da nanocamada (constante e igual a 3).

Xie et al. (2005) consideraram que a principal deficiência dos modelos tradicionais para a predição da condutividade térmica de nanofluidos é deixar de levar em consideração alguns mecanismos. Assim, derivaram da solução geral da condução de calor em coordenadas esféricas e do modelo de esfera rígida equivalente, uma expressão para determinar a condutividade térmica, considerando a espessura de nanocamada, tamanho de nanopartícula, concentração e as condutividades das partículas e do fluido base. A espessura, a microestrutura, e as propriedades físico-químicas desta nanocamada são fortemente dependentes das nanopartículas suspensas, do fluido base, e das interações entre eles. É esperado que a nanocamada apresente propriedades intermediárias entre as nanopartículas e o fluido base. Foi assumida uma variação linear neste modelo. Determinando a espessura da nanocamada, foi possível determinar sua condutividade térmica e, conseqüentemente, do nanofluido

$$k_{nf} = 1 + 3\theta \cdot \phi_t + 3\theta^2 \cdot \left(\frac{\phi_t}{1 - \theta \cdot \phi_t}\right) \quad (2.10)$$

$$\text{Onde: } \phi_t = \phi \cdot (1 + \beta^3); \quad \theta = \beta_{lf} \cdot \left[\frac{(1 + \beta)^3 - \frac{\beta_{pl}}{\beta_{fl}}}{(1 + \beta)^3 + 2\beta_{lf} \cdot \beta_{pl}} \right]; \quad \beta_{fl} = \frac{k_{bf} - k_{lr}}{k_{bf} + 2k_{lr}}; \quad \beta_{pl} = \frac{k_p - k_{lr}}{k_p + 2k_{lr}};$$

$$\beta_{lf} = \frac{k_{lr} - k_{bf}}{k_{lr} + 2k_{bf}}; \quad \beta = \frac{h}{r}; \quad M = \varepsilon(1 + \beta) - 1; \quad \varepsilon = \frac{k_p}{k_{bf}}; \quad k_{lr} = \frac{M^2}{(M - \beta) \cdot \ln(1 + M) + \beta \cdot M};$$

Onde h é a espessura da nanocamada (constante e igual a 5 para os fluidos comparados), M e θ são parâmetros auxiliares para determinação da influência da nanocamada na condutividade térmica dos nanofluidos.

Gao e Zhou (2006) desenvolveram um modelo ajustável conforme a forma das nanopartículas, tendo como base os modelos de Maxwell e Bruggeman. Foi adicionado ao modelo clássico um fator de forma, que é igual a $1/3$ para partículas esféricas e para este valor a condutividade efetiva atinge seu mínimo, reforçando a teoria de que partículas alongadas proporcionam maior condutividade térmica aos nanofluidos.

$$1 - \phi = \left[\frac{k_p - k_{nf}}{k_p - k_{bf}} \right] \cdot \left(\frac{k_{bf}}{k_{nf}} \right)^{1/3} \quad (2.11)$$

Prasher et al. (2006) propuseram que a convecção devido ao movimento Browniano de nanopartículas é a principal causa do incremento da condutividade em nanofluidos. Sendo assim, consideraram que cada aglomeração de nanopartículas possui um raio de rotação, e o aumento na condutividade térmica ocorre devido a facilidade da condução de calor ao longo da espinha dorsal da aglomeração e, depende, além da concentração volumétrica de nanopartículas, ϕ , da concentração das aglomerações, ϕ_a , da concentração de nanopartículas dentro das aglomerações, ϕ_{int} e do raio de rotação das aglomerações. Baseado nesta nova teoria, modificaram a correlação de Maxwell de forma a criar uma nova equação para determinar a condutividade térmica de nanofluidos. Neste modelo, eles comentaram que devido à natureza convectiva da transferência de calor, qualquer modelo proposto tem uma essência semi-empírica incluída que necessita de simulação numérica. Neste trabalho, foram considerados três possíveis mecanismos para descrever a transferência de calor e energia em nanofluidos: o movimento de translação Browniano, a existência de um potencial entre as partículas e a convecção no líquido devido ao movimento browniano das partículas.

A correlação que representa o modelo de Prasher é apresentada na Eq. 6 .

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi_a \cdot (k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi_a \cdot (k_p - k_{bf})} \quad (2.12)$$

Onde: $\phi = \phi_{int} \cdot \phi_a$

Considerando a não existência de aglomerações, o modelo de Prasher fica reduzido a equação de Maxwell.

2.5.1.1 Influência dos parâmetros nos modelos para condutividade térmica de nanofluidos

- Influência do tamanho das nanopartículas: Menores tamanhos de nanopartículas apresentam maiores áreas superficiais totais para uma mesma concentração. Devido à essa maior área, é esperado uma maior condutividade térmica para nanofluidos com partículas menores. As Figs. 2.6 e 2.7 mostram a influência do tamanho segundo os modelos, para óxido de alumínio e óxido de cobre em água, respectivamente. Verifica-se que a condutividade diminui significativamente apenas para pequenos diâmetros. Para maiores diâmetros a influência do tamanho se torna desprezível ou nula.

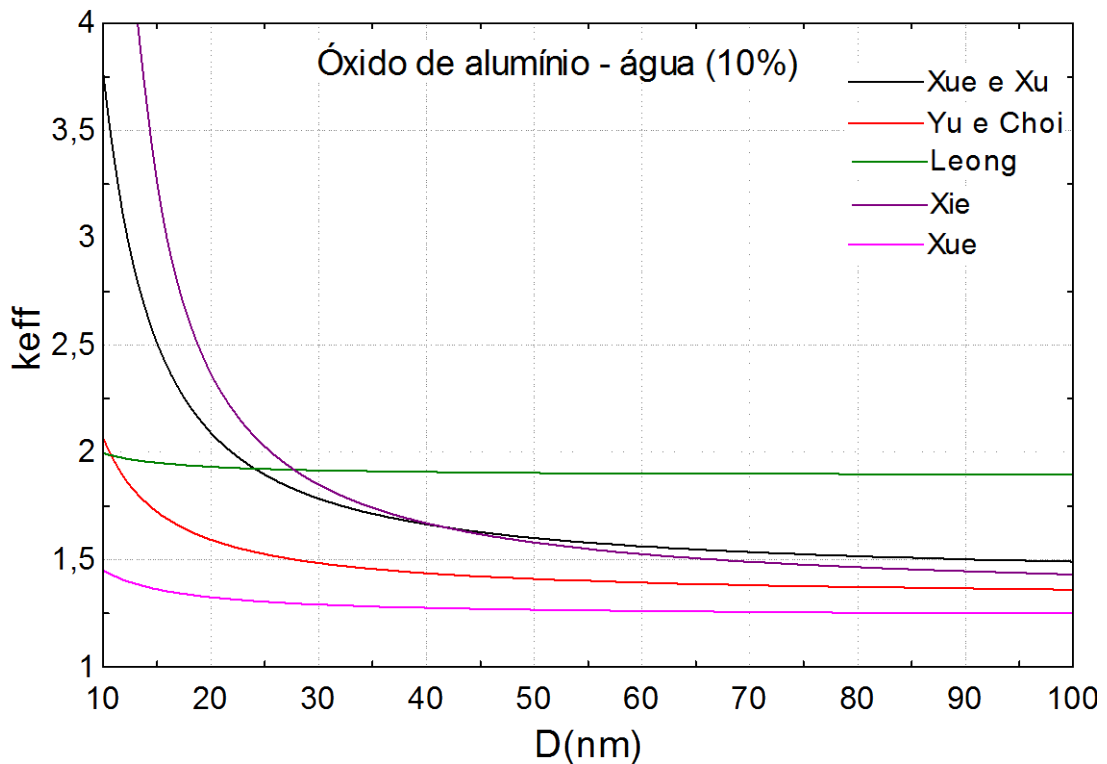


Figura 2.6 – Influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (alumina-água).

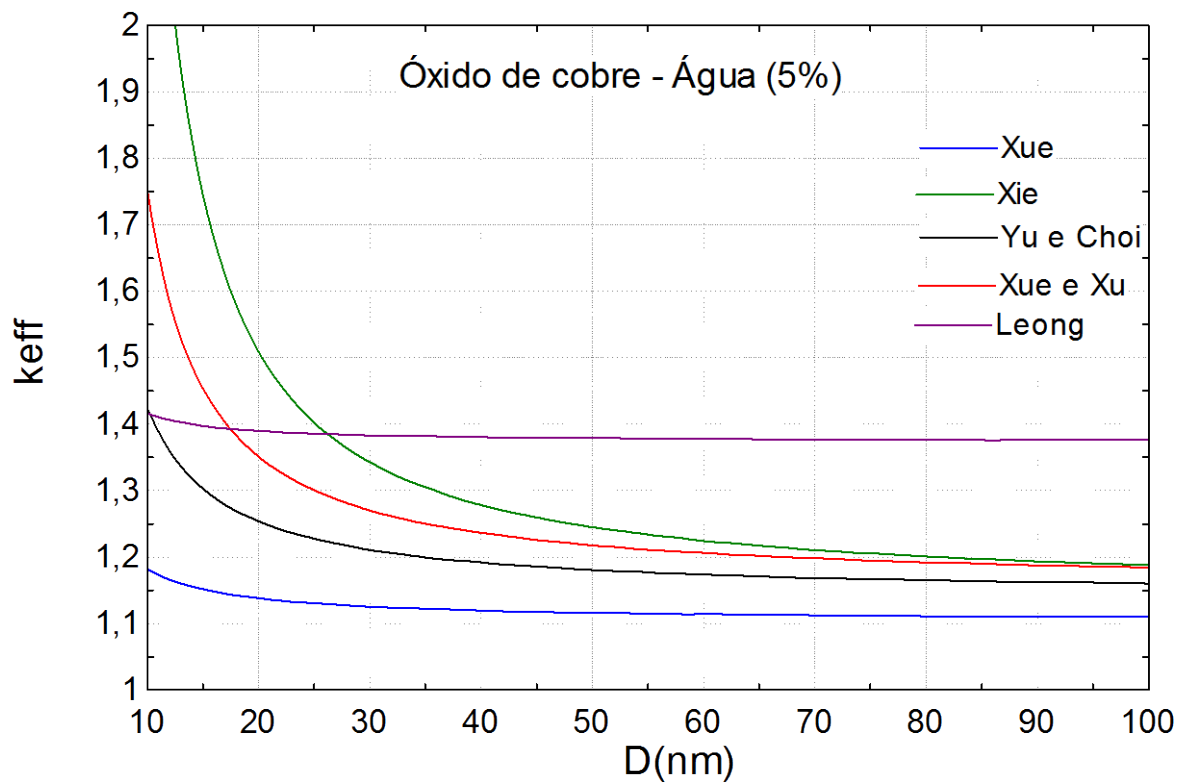


Figura 2.7 – Influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (óxido de cobre-água).

- Influência da espessura de nanocamada: Outro parâmetro levado em consideração nos modelos é a espessura de camada interfacial. Nas figuras 2.8 e 2.9 é possível observar que este parâmetro influencia significativamente a condutividade térmica, de acordo com os modelos teóricos. Quanto maior esta interface partícula-fluido, maior a intensificação da condutividade térmica. Porém, este parâmetro ainda necessita ser melhor estudado para uma abordagem mais consistente de sua influência nas propriedades dos nanofluidos.

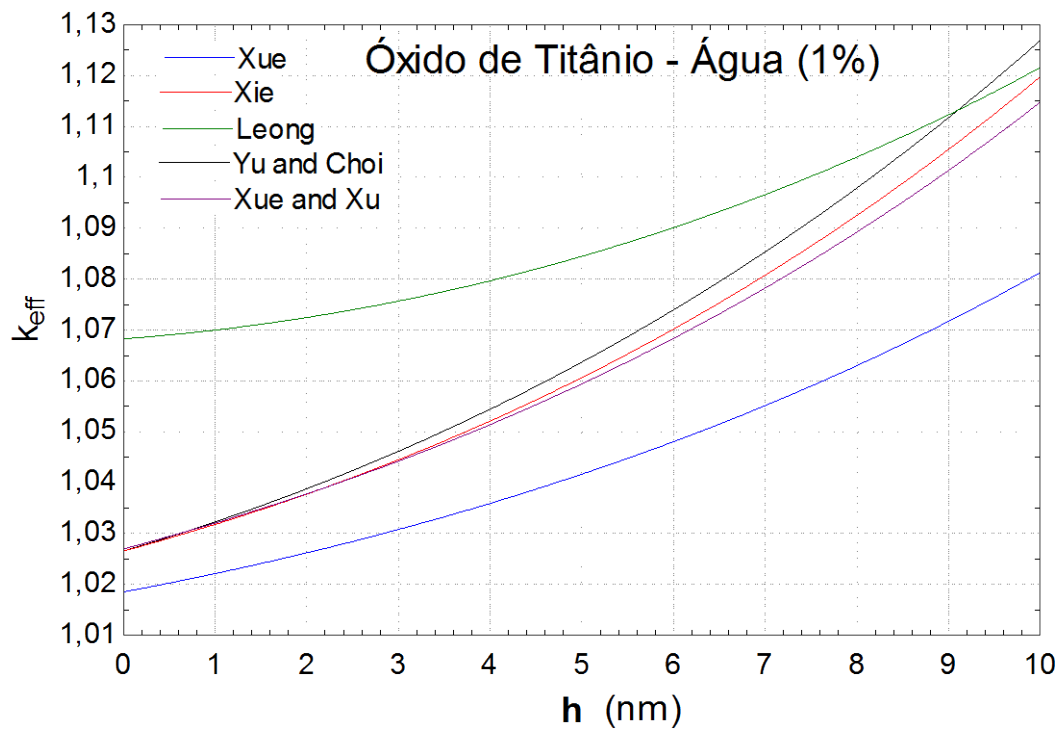


Figura 2.8 – Influência da espessura de nanocamada na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (óxido de titânio-água).

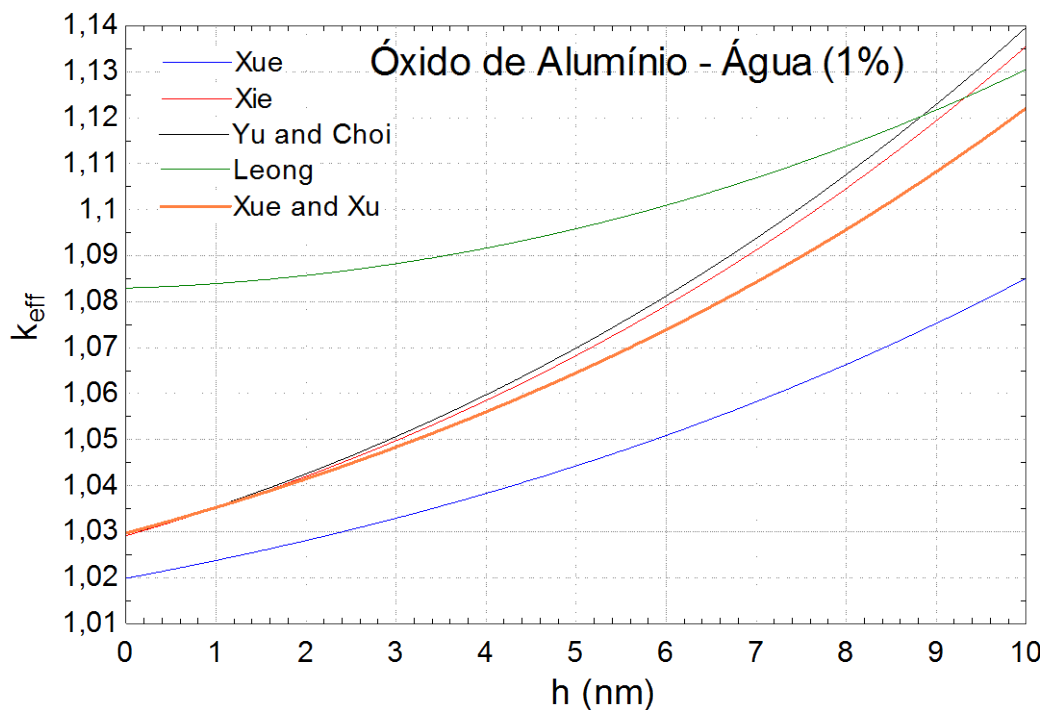


Figura 2.9 – Influência da espessura de nanocamada na condutividade térmica de nanofluidos de acordo com os modelos (alumina-água).

2.5.2 Métodos de medição da condutividade térmica

Diversos autores mediram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos nos últimos anos. A seguir, são apresentados os principais métodos encontrados na literatura para medir a condutividade térmica de nanofluidos

- **KD2 PRO:** O KD2 Pro é um equipamento totalmente portátil que analisa as propriedades térmicas difusividade, calor específico, condutividade e resistividade de fluidos. O princípio de operação está baseado no método “transient line heat source”. Compreende basicamente uma unidade de leitura de mão e um único sensor de agulha que está inserido na amostra de fluido. Uma leitura única geralmente leva 2 minutos. Os primeiros 90 segundos são utilizados para assegurar a estabilidade da temperatura, depois a sonda é aquecida durante 30 segundos utilizando uma quantidade conhecida de corrente. A sonda também contém um termistor que mede a variação de temperatura enquanto o microprocessador armazena os dados. No final da leitura, a condutividade térmica do fluido é calculada a partir da diferença de temperatura e dados de tempo (Mintsa et al., 2009).



Figura 2.10 – KD2 Pro Analyzer

- **Fio quente transiente:** O método do fio quente (THW), proposto por Davis (1984), é uma técnica padrão transiente, baseada na medição do aumento da temperatura de uma fonte de calor linear (fio quente). Este fio metálico imerso num fluido de teste, inicialmente em equilíbrio térmico, é conectado a uma fonte de voltagem contínua que, portanto produz um fluxo de calor constante ao longo deste. Se o fluxo de calor é considerado constante e uniforme ao longo do comprimento da amostra, a condutividade térmica pode ser derivada diretamente da variação da temperatura em um intervalo de tempo conhecido. O aumento transiente da

temperatura no fio, medida através da sua resistência elétrica, depende da condutividade térmica do líquido circundante utilizado no teste (Shalkevich, 2009).

Sendo q é a quantidade constante de produção de calor por unidade de tempo e por unidade de comprimento do fio (W/m), iniciada no tempo $t = 0$ e o fluxo de calor radial ocorre em torno do fio, então, o aumento de temperatura $\Delta T(r_f, t)$ na posição r_f radial da fonte de calor pode ser modelado acordo com a Eq. 2.

O modelo matemático do método é baseado no suposto que o fio quente é uma fonte ideal e que está imerso em um material homogêneo e isotrópico com temperatura inicial constante.

$$\Delta T(r_f, t) = \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha t}{r_f^2 C} \quad (2.14)$$

Onde k é a condutividade térmica (W/m-K), α é difusividade térmica (m^2/s) do fluido de ensaio e $C = e^\gamma$ com $\gamma = 0,5772157$. Este modelo é válido só quando $\frac{r_f^2}{4\alpha t} \ll 1$.

Ainda existe o método do fio quente curto (Transient short hot wire), que é um processo derivado do método do fio quente, e se baseia no mesmo princípio, porém é utilizado um fio menor com a mesma razão entre o diâmetro e comprimento do fio comum.

- Cilindros coaxiais: Nesta técnica, usada por Glory et al. (2008) para calcular a condutividade térmica de uma solução de água e nanotubos de carbono, são utilizados dois cilindros ocos concêntricos de material metálico. O espaço entre os cilindros é preenchido com uma amostra do fluido a ser analisado.

No cilindro interno, as paredes são aquecidas por uma banda térmica e no cilindro externo são instalados termopares para a medição da temperatura da parede deste.

Neste método é medida a diferença de temperatura entre os cilindros, a partir do momento em que o fluxo de calor que passa através do fluido em regime permanente. A condutividade térmica é calculada usando o modelo proposto por Ziebland (1969), mostrado na Eq. 2.13.

$$k = C_{geom} \frac{Q_1 - Q_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (2.13)$$

Onde ΔT_1 e ΔT_2 são diferenças de temperatura através da camada de fluido correspondentes aos fluxos de calor Q_1 e Q_2 respectivamente. C_{geom} é um fator geométrico.

- Placas quentes paralelas: Neste método, baseado na lei de Fourier para condução de calor; é gerado um fluxo unidimensional de calor através de uma fina camada de fluido de teste. Se a diferença de temperatura através desta camada (ΔT), a espessura (L) e o fluxo de calor por unidade de área \dot{q}'' são conhecidos, então, a condutividade térmica do fluido de teste pode ser calculada como:

$$k = \frac{\dot{q}'' L}{\Delta T} \quad (2.15)$$

- Placa quente isolada: Este método utilizado para determinar algumas propriedades de transporte de fluidos, consiste em dois discos coplanares, com separação estreita entre eles, onde são mantidos em equilíbrio térmico, de modo a fornecer um fluxo unidimensional através do fluido de teste.

Neste método de medição, usado por Sanjaya et al. (2011), a condutividade térmica da amostra estudada é obtida através da aplicação da lei de Fourier modificada, mostrada na Eq. 2.16

$$kA \left[\left(\frac{\Delta T}{d} \right)_{\text{inf}} + \left(\frac{\Delta T}{d} \right)_{\text{sup}} \right] = \frac{V_1^2}{R} \quad (2.16)$$

Onde A é a área do disco central, V_1 a voltagem aplicada à resistência aquecedora R , d a espessura da amostra e os sufixos inf e sup, correspondem à amostra inferior e superior respectivamente.

O aparelho consiste de dois discos co-planares, concêntricos, com separação estreita, com geração de calor produzida por uma resistência elétrica interna. Estes discos encontram-se na metade de uma câmara fechada, separando o fluido de análise em duas partes, uma superior e uma inferior, que ao mesmo tempo estão limitadas por aquecedores auxiliares, dispostos de modo a manter condições de equilíbrio térmico dentro da câmara. A temperatura do fluido de teste é medida através de termopares imersos dentro deste e através da qual vai ser calculado o fluxo de calor que servirá como referência para obter a condutividade térmica da amostra e calculada através da lei de Fourier modificada.

- **Forced Rayleigh Scattering:** O método de Rayleigh é uma técnica de aplicação óptica não invasiva, que pode ser utilizada para estudar a propriedades de transporte e o fenômeno de difusão de diferentes materiais e fluidos. Esta técnica, baseada no princípio de difusão térmica, consiste no espalhamento de dois feixes de laser que ao se interceptarem, num material de teste, produzem uma malha óptica dinâmica. O material de teste absorve uma pequena parcela da radiação dos feixes, que é rapidamente transformada em energia térmica, produzindo um campo de temperatura. Segundo Pohl et al. (1973), o gradiente de temperatura (δT) que acontece na amostra de material, é função da condutividade térmica (k) do material de teste, da intensidade (I) e absorvidade (α_3) dos feixes laser e do módulo do vetor da malha dinâmica, \vec{k} :

$$k \approx \frac{2\alpha_3(I_1 I_2)^{1/2}}{\kappa^2 \delta T} \quad (2.17)$$

De acordo com Venerus et al. (2006), mudanças na modelagem do método, para a sua aplicação em nanofluidos, permitem determinar a condutividade térmica destes através das suas propriedades. Assim, a condutividade térmica, pode ser obtida através da Eq. 2.18

$$\rho C_p \frac{d}{dt}(\delta T) \approx -kg\delta T \quad (2.18)$$

Onde ρ é a densidade, c_p o calor específico, k a condutividade térmica medida na direção do vetor g da grade óptica.

- **Método 3ω :** O método 3ω é amplamente utilizado para medir as propriedades termofísicas de filmes finos e substratos sólidos. Uma corrente elétrica senoidal com uma frequência angular ω é passada através de um aquecedor de película fina de metal modelados sobre o substrato sólido de interesse. O aquecedor de metal também funciona como um termômetro. Devido ao aquecimento com uma frequência duas vezes maior que a corrente de entrada, a temperatura do metal também oscila com uma frequência angular 2ω . Uma vez que a resistência elétrica do aquecedor de metal é uma função linear da temperatura, a oscilação da temperatura pode ser medida indiretamente através da medição da tensão associada 3ω através do aquecedor de metal. A amplitude e a fase da oscilação da temperatura podem ser

utilizadas para determinar as propriedades termofísicas do substrato uma vez que estes parâmetros estão relacionados uns com os outros através da solução da equação de energia para a geometria dada e um conjunto de condições de contorno (Lee, 2008).

Considere um aquecedor de metal com largura de $2b$ sobre um substrato. A relação entre a oscilação da temperatura e da taxa de geração de calor é expressa como como:

$$\Delta T = \frac{\dot{q}}{\pi k} \int_0^\infty \frac{\text{sen}^2(kb)}{(kb)^2(k^2+q^2)^{1/2}} dk = \frac{\dot{q}}{\pi k} F(qb) \quad (2.19)$$

onde $q = \sqrt{\frac{i2\omega\rho c_p}{k}}$ e $\Delta T = \Delta T_r + i\Delta T_i$

2.5.3 Resultados experimentais para a condutividade térmica de nanofluidos

Incrementos anômalos na condutividade térmica de nanofluidos incentivaram muitos pesquisadores a investigar esta propriedade desta classe de fluidos. A tabela 2.2 mostra alguns resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos. A condutividade térmica é dependente da concentração de nanopartículas e também do tamanho, entretanto este parâmetro com menor influência. Outras propriedades como pH e temperatura também apresentam influência, porém não foi analisada neste trabalho.

Tabela 2.2– Resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	Concentração	Incremento máximo na condutividade térmica	Método de Medição
	Tipo	Tamanho					
Karthikeyan et al. (2008)	CuO	8nm	Água, etilenoglicol	Ultrasonic horn 250W, 30 min	0-1%	30%	linha de fonte de calor
Wang (2003)	CuO	50nm	Água		0-0.5%	17%	Quase-Steady-State
Jang et al. (2008)	Al ₂ O ₃	30nm	Água	Sonicação, 30-40kHz, 5-20h	0-0.3%	3%	Transient hot wire
Chandrasekar et al. (2010)	Al ₂ O ₃	43nm	Água	Sonicação, 36kHz, 6h, 100W	0-3%	10%	KD2 analyzer
Zhang et al. (2007)	Al ₂ O ₃	20nm	Água	Sonicação	0-14%	20%	Transient SHW
	CuO	33nm	Água		0-5%	15%	
	Au	1.65nm	Tolueno			8%	
	TiO ₂	40nm	Água		0-2.5%	5%	

Tabela 2.2 (continuação) – Resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	Concentração	Incremento máximo na condutividade térmica	Método de Medição
	Tipo	Tamanho					
Moosavi et al. (2010)	ZnO	50nm	Etilenoglicol	Agitador magnético	0-3%	10%	KD2 analyzer
Yu et al. (2009)	ZnO	15nm	Etilenoglicol	Sonicação, 40kHz, 150W, 3h	0-5%	25%	Transient SHW
Mintsa et al. (2009)	Al ₂ O ₃	36nm	Água	Comprados da Nanophase Technologies	0-18%	30%	KD2 analyzer
	Al ₂ O ₃	47nm	Água		0-17%	30%	
	CuO	29nm	Água		0-16%	25%	
Lee et al. (2011)	SiC	100nm	Água	Sonicação, 12h	0-3%	7%	KD2 analyzer
Casquillas et al. (2007)	CNT		Etilenoglicol		0-1%	21%	dispositivo tiras a quente
Jahanshahi et al. (2010)	SiO ₂	12nm	Água	Sonicação, 30min	0-4%	20%	Transient hot wire
Hong et al. (2005)	Fe	10nm	Etilenoglicol	Sonicação, 20KHz, 700W, 10-70min	0-0.5%	14%	Transient hot wire
Yoo et al. (2007)	Al ₂ O ₃	48nm	Água	Sonicação, 20kHz, 700W, 50min	0-1%	4%	Transient hot wire
	TiO ₂	25nm	Água		0-1%	14%	
	Fe	10nm	Etilenoglicol		0-0.55%	18%	
	WO ₃	38nm	Etilenoglicol		0-0.3%	14%	
Li e Peterson (2007)	Al ₂ O ₃	36nm	Água	Sonicação, 90min	0-6%	27%	steady state cut bar
	Al ₂ O ₃	47nm	Água		0-6%	25%	
Duangthongsuk e Wongwises (2010)	TiO ₂	21nm	Água	Comprado Da Degussa	0-1%	4%	Transient hot wire
Oh et al. (2008)	Al ₂ O ₃	45nm	Água	Sonicação, 15h	0-4%	13.3%	3 ω
	Al ₂ O ₃	45nm	Etilenoglicol		0-4%	9.7%	
Murshed et al. (2008)	Al ₂ O ₃	80nm	Água		0-5%	22%	Transient hot wire
	Al ₂ O ₃	150nm	Água		0-0.5%	2%	
	Al ₂ O ₃	80nm	Etilenoglicol		0.5-1%	36%	
	Al	80nm	Etilenoglicol		0-5%	46%	
	TiO ₂	15nm	Água		0-5%	18%	
Hwang et al. (2007)	CNT	30nm \times 50 μ m	óleo	Sonicação, 2h	0-0.5%	9%	Transient hot wire
	CNT	30nm \times 50 μ m	Água		1%	7%	
	fulereno	10nm	óleo		0-5%	6%	
	SiO ₂	12nm	Água		1%	3%	
	CuO	33nm	Água		1%	5%	
Gao e Zhou (2006)	CNT		óleo		0-1%	150%	
Choi et al. (2001)	CNT	25nm \times 50 μ m	óleo		0-1%	150%	Transient hot wire

Tabela 2.2 (continuação) – Resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	Concentração	Incremento máximo na condutividade térmica	Método de Medição
	Tipo	Tamanho					
Jana et al. (2007)	CNT	10nmx10µm	Água	Sonicação, 1h	0-0.8%	34%	Modified Hot wire
Chen et al. (2008)	CNT	15nmx30µm	Água		0-1%	12%	Transient SHW
Xie et al. (2003)	CNT	15nmx30µm	Água	Sonicação	0-1%	7%	Transient hot wire
	CNT	15nmx30µm	etilenoglicol		0-1.5%	30%	
Jiang et al. (2009)	CNT	80nmx10µm	R113	Processador Ultrassônico, 30min	0-1%	50%	Transient Plane Source
		80nmx1.50µm	R113		0-1%	40%	
		15nmx10µm	R113		0-1%	100%	
		15nmx1,5µm	R113		0-1%	80%	
Paul et al. (2012)	Prata	55 nm	Água		0-0,1%	21%	Transient hot wire
Presente trabalho	Prata	10 e 80 nm	Água	Homogeneização a alta pressão	0-0,3%	18%	Transient hot wire

Como observado na tabela 2.2, a maioria dos fluidos analisados são compostos por óxidos metálicos. Estes materiais se misturam mais facilmente com os fluidos base analisados do que outros tipos de nanopartículas, principalmente com água. Por outro lado, na maioria dos casos, ocorre decantação das nanopartículas, ainda que a médio prazo.

Os resultados se mostram conflitantes. Por exemplo, Li e Peterson (2007) apontam um incremento de 27% para uma concentração de 6% no nanofluido de alumina em água, enquanto Mintsa et al. (2009) encontraram um incremento de 30% para o mesmo nanofluido a uma concentração de 18%. Por outro lado, é possível observar que a condutividade térmica aumenta com a concentração de nanopartículas, fato que foi observado por todos os autores analisados. Além disso, os incrementos mais anômalos são para nanofluidos com nanopartículas de alta condutividade e fluidos base de baixa condutividade.

O tamanho e o formato das nanopartículas também têm influência. Espera-se que partículas menores e mais alongadas incrementem mais a condutividade térmica dos fluidos, porém com relação ao tamanho os resultados são conflitantes, não sendo possível estabelecer uma tendência ao comparar dados da literatura. Este fato poderá ser melhor observado na comparação entre resultados experimentais.

2.6 Viscosidade de Nanofluidos

A viscosidade de nanofluidos também tem sido escopo de várias pesquisas envolvendo nanofluidos. As nanopartículas são mais densas que os fluidos base, como seria de se esperar e, conseqüentemente, a viscosidade dos nanofluidos é superior a dos fluidos base. Tendo em vista a utilização de nanofluidos em trocadores de calor, é essencial determinar sua viscosidade para calcular a queda de pressão e o coeficiente de transferência de calor.

2.6.1 Modelos para previsão da viscosidade

Alguns autores propuseram modelos para a previsão da viscosidade de soluções sólido-líquido. A maioria destes modelos é baseada na teoria de Einstein (1906), que propôs um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Navier-Stokes. As partículas são esferas rígidas e não interagentes (Motta, 2012). A tabela mostra as equações dos principais modelos para a viscosidade destas soluções.

Tabela 2.3 – Modelos clássicos de previsão de viscosidade em suspensões sólido-líquido

Autor	Modelo	Equação nº
Einstein (1906)	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_{bf}$	(2.20)
De Bruijn (1942)	$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{1 - 2.5\phi + 1.552\phi^2}\right)\mu_{bf}$	(2.21)
Vand (1948)	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 7.349\phi^2)\mu_{bf}$	(2.22)
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}\mu_{bf}$	(2.23)
Batchelor (1977)	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2)\mu_{bf}$	(2.24)
Maiga (2004)	$\mu_{nf} = (1 - 0.19\phi + 306\phi^2)\mu_{bf}$	(2.25)

Uma deficiência destes modelos é não considerar a densidade e natureza das nanopartículas no cálculo da viscosidade dos nanofluidos. Assim, para uma mesma concentração e fluido base, dois nanofluidos apresentariam a mesma viscosidade, mesmo com nanopartículas de naturezas diferentes. Além disso, não é levado em consideração o tamanho das partículas, representando mais uma inconsistência dos modelos. Na literatura há alguns modelos mais recentes que levam em consideração mais parâmetros.

Masoumi et al. (2009) introduziram um modelo considerando o movimento browniano e a velocidade relativa existente entre as nanopartículas e o fluido base. Por ser uma

velocidade baixa, o fluido pode ser considerado como em regime de Stokes, ou seja, a força de resistência ao movimento é proporcional a velocidade das nanopartículas (Santos, 2007). O modelo é expresso em função da temperatura, concentração e propriedades do fluido e partículas. Assim como para a condutividade térmica, as comparações estão baseadas na viscosidade relativa:

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \quad (2.26)$$

A equação 2.7 representa o modelo de Masoumi et al. (2009):

$$\mu_{eff} = \mu_{bf} + \frac{\rho_p v_B D_p^2}{7CH} \quad (2.27)$$

Onde v_B é a velocidade browniana, C é uma constante de correção, dependente da viscosidade do fluido base, concentração e tamanho das nanopartículas e H é a distância entre as nanopartículas. A velocidade browniana pode ser dada por:

$$v_B = \frac{1}{D_p} \sqrt{\frac{18K_b T}{\pi \rho_p D_p}} \quad (2.28)$$

Baseado na teoria da viscosidade de Eyring e no modelo de dois líquidos não aleatórios para descrever os desvios, Hosseini e Ghader (2010) desenvolveram um modelo para predição de viscosidade em nanofluidos que leva em consideração a concentração volumétrica de nanopartículas e a temperatura. O modelo é baseado nas probabilidades de interação entre as partículas, tanto de fluido como de nanopartículas e, conseqüentemente, as energias associadas a estas interações. Comparando com resultados experimentais, os erros foram menores quando considerado a temperatura, ou seja, a temperatura têm grande influência na viscosidade dos nanofluidos.

Com base em seus experimentos, Namburu et al. (2007) propuseram uma correlação empírica para determinar a viscosidade dinâmica de um nanofluido de CuO em uma mistura de água e etilenoglicol. Analisaram a influência da concentração volumétrica e da temperatura na viscosidade deste nanofluido, encontrando que a viscosidade dos nanofluidos varia de forma exponencial com a temperatura.

$$\log(\mu_{nf}) = A_1 \cdot e^{-B_1 T} \quad (2.28)$$

Onde os coeficientes A_1 e B_1 estão relacionados com a concentração de nanopartículas.

2.6.2 Métodos de medição de viscosidade

A seguir são apresentadas alguns equipamentos utilizados para a medição da viscosidade de fluidos.

- Viscosímetro tipo pistão: consiste de um pistão metálico que se move dentro de uma câmara preenchida com o fluido, sob a influência de um campo magnético oscilante. O período de oscilação do pistão é proporcional à viscosidade, para uma dada intensidade de campo. A temperatura do fluido se mantém constante durante a medição (Motta, 2012).
- Viscosímetro rotacional: a viscosidade é determinada através da velocidade angular de uma parte móvel separada de uma parte fixa pelo líquido. Pode apresentar duas geometrias, cone-placa e placa-placa. Na primeira, a parte fixa é, geralmente, a parede do recipiente onde está o líquido. Na segunda, a parte móvel pode apresentar o formato de palhetas ou cilindro. O cone gira sobre o líquido entre ele e uma placa fixa (Motta, 2012).
- Viscosímetro capilar: é derivado de sistemas dedicados a medição de queda de pressão em microcanais. A taxa de cisalhamento na parede do microcanal é medida diretamente através da queda de pressão e a taxa de cisalhamento na parede é medida através da taxa de fluxo (Chevalier, 2007).

2.6.3 Resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos

Além da condutividade térmica, é necessário a determinação da viscosidade dos nanofluidos, para a estimativa dos coeficientes de transferência de calor. Além disso, a elevada viscosidade dos nanofluidos implica numa maior perda de carga em escoamento e seu valor deve ser conhecido para estimativa dessa perda. A tabela 2.4 mostra alguns estudos experimentais relacionados a esta propriedade dos nanofluidos.

Tabela 2.4 – Resultados experimentais da literatura para a viscosidade de nanofluidos.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	ϕ	Incremento máximo na viscosidade	Método de Medição
	Tipo	Tamanho					
Chandrasekar et al. (2010)	Al ₂ O ₃	43nm	Água	Sonicação, 36kHz, 6h, 100W	0-5%	150%	Cone and plate viscometer

Tabela 2.4 (continuação) – Resultados experimentais da literatura para a viscosidade de nanofluidos.

Autores	Nanopartículas		Fluido Base	Preparação	ϕ	Incremento máximo na viscosidade	Método de Medição
	Tipo	Tamanho					
Murshed et al. (2008)	TiO ₂	15nm	Água		0-5%	90%	Controlled rate rheometer
	Al ₂ O ₃	80nm	Água		0-5%	90%	
Duangthongsuk Wongwises (2009)	TiO ₂	21nm	Água	Comprado da Degussa	0-2%	18%	Reômetro rotacional
Chevalier et al. (2007)	SiO ₂	35nm	Álcool	Precipitação da sílica no álcool	0-5%	65%	Micro viscosímetro Capilar
	SiO ₂	94nm	Álcool		0-5%	45%	
	SiO ₂	190nm	Álcool		0-6%	45%	
Nguyen et al. (2008)	Al ₂ O ₃	36nm	Água	Nanophase Technologies, USA	0-7%	65%	ViscoLab450 (Cambridge)
	Al ₂ O ₃	47nm	Água		0-4%	65%	
Wang (1999)	Al ₂ O ₃	28nm	Água	Misturador, 90 min, Banho ultrassônico, 30min	0-6%	75%	
Kole e Dey (2010)	Al ₂ O ₃	50nm	Refrigerante automotivo	Sonicação, 3h, Agitação magnética, 1h	0-1.6%	140%	Brookfield Programmable viscometer
Kole e Dey (2011)	CuO	40nm	óleo de motor	Sonicação, 4h, Agitação magnética, 2h	0-2.5%	200%	Brookfield programmable viscometer
Namburu et al. (2007)	CuO	29nm	Água + Etilenoglicol	Sonicação, 30min	0-6%	300%	Brookfield programmable viscometer
Presente trabalho	Prata	10 e 80 nm	Água	Homogeneização a alta pressão	0-0,3 %	4%	Viscosímetro de cone e placa

Deve-se destacar da tabela que a maioria dos nanofluidos analisados são compostos de óxidos metálicos, por serem estabilizados com maior facilidade. A maioria destes estudos demonstram incrementos muito superiores ao aumento na condutividade térmica dos nanofluidos. Apesar de não estudada neste trabalho, a temperatura apresenta uma influência significativa na viscosidade relativa dos nanofluidos, ou seja, o incremento a uma dada concentração varia sensivelmente com a temperatura.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA LITERATURA

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma análise crítica entre resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos, levantados nos últimos 3 anos. Foram coletados mais de 100 pontos de dados experimentais, publicados em periódicos por diversos autores, que pesquisaram estas propriedades para diversos nanofluidos.

As equações dos modelos teóricos comparados foram simuladas no EES, a fim de comparar as previsões para a condutividade térmica e viscosidade com resultados experimentais. As curvas de validação para os modelos de condutividade térmica encontram-se no Apêndice B.

Primeiro, é apresentada uma comparação entre dados experimentais e correlações da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos, visando analisar quais correlações apresentam um ajuste razoável a dados experimentais. Em seguida uma comparação entre resultados experimentais de diversos autores para nanofluidos de mesma natureza, para verificar se houve repetibilidade nos resultados de diferentes pesquisadores. Análise semelhante foi realizada para a viscosidade de nanofluidos.

Os parâmetros analisados foram a concentração volumétrica e tamanho de nanopartículas. Outros fatores como a temperatura também apresentam influência nestas propriedades de nanofluidos, porém não foi analisada neste trabalho, por não serem parâmetros informados em todos os artigos. Para tanto, é considerada a condutividade térmica relativa, que é a razão entre a condutividade do nanofluido e do fluido base, que devem ser medidos à mesma temperatura. O mesmo idêa se aplica à viscosidade.

3.2 Condutividade térmica

3.2.1 Comparações entre modelos e resultados experimentais da literatura

Para realizar comparações com resultados experimentais, os dados de cada experimento devem substituir os parâmetros das correlações, obtendo a previsão da correlação para as condições do experimento a ser comparado, assim cada resultado experimental pode ser comparado com as correlações propostas. Vale ressaltar que alguns modelos não consideram alguns parâmetros que são informados nos experimentos, como a temperatura, porém não podem ser incluídos no cálculo da condutividade efetiva através da correlação. Além disso, algumas correlações consideram parâmetros que não são informados nos experimentos, pela dificuldade de medir estes fatores, como a espessura de nanocamada e a condutividade da nanocamada. Estes fatores são empíricos e devem ser determinados com base nos resultados experimentais. Nesse caso, foram mantidos os valores propostos nas correlações para o cálculo da condutividade térmica. As Figs. 3.1 a 3.21 mostram comparações entre os modelos e resultados experimentais da literatura para a condutividade térmica de nanofluidos. Foram realizadas comparações apenas para nanofluidos de nanopartículas esféricas, pois para este tipo de partículas estão desenvolvidas a maioria das correlações. Para as demais, seria necessário determinar fatores de forma, que são triviais apenas para partículas esféricas.

Na Fig. 3.1 pode-se observar que para os experimentos de Jang et al. (2008), que analisou o nanofluido de alumina-água em baixas concentrações, os resultados superam as estimativas das correlações. Já nas Figs. 3.2 e 3.3, que mostram os resultados de Lee e Mudawar (2007) e Mintsa et al. (2009), as comparações mostram que para concentrações mais elevadas a maioria das correlações superestimam o valor da condutividade térmica, e a correlação que mais se aproxima dos resultados experimentais é a de Maxwell (1873). Vale ressaltar que a maioria dos modelos foram propostos para concentrações baixas.

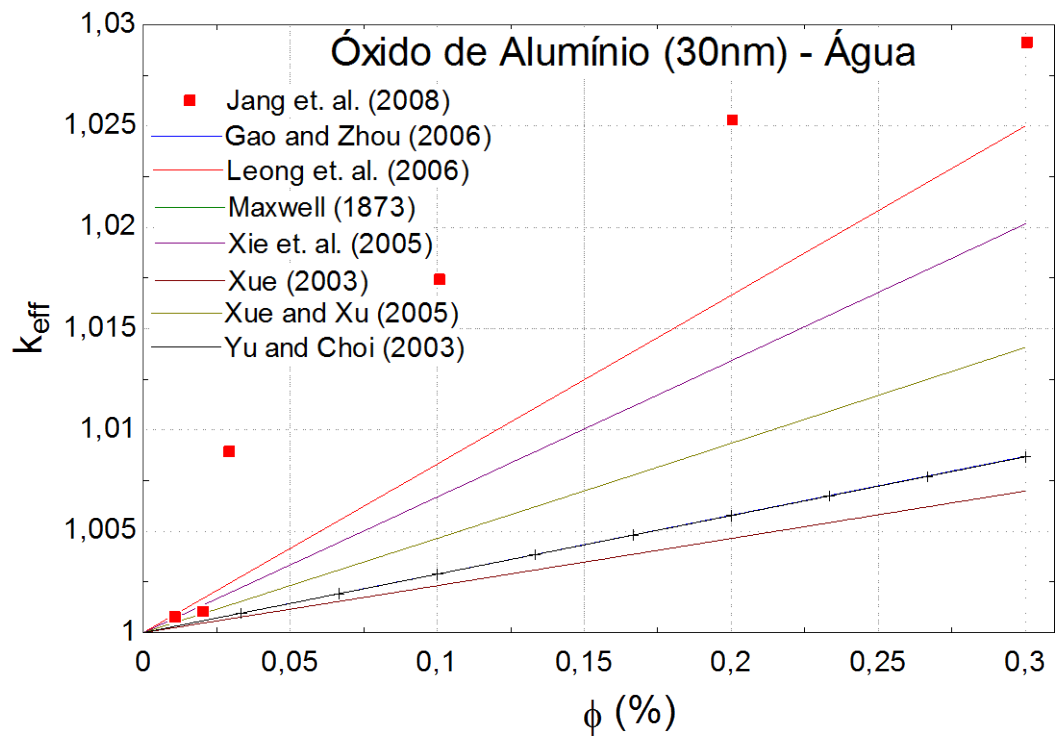


Figura 3.1 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (30 nm).

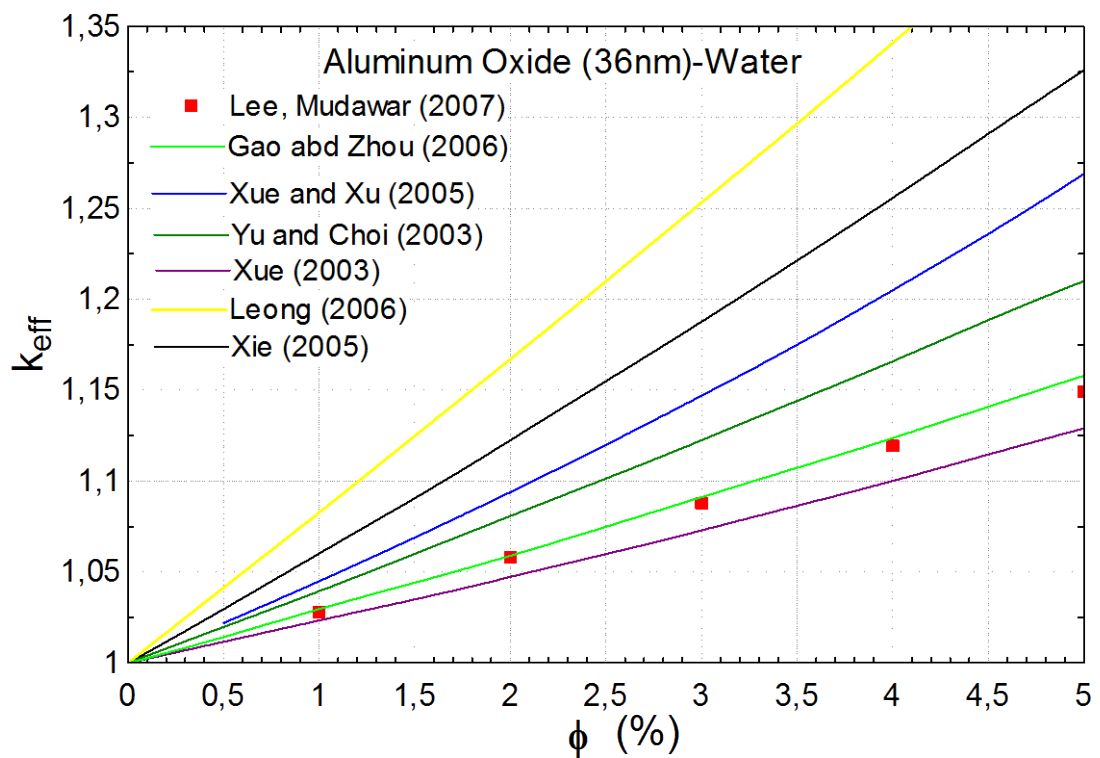


Figura 3.2 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (36 nm).

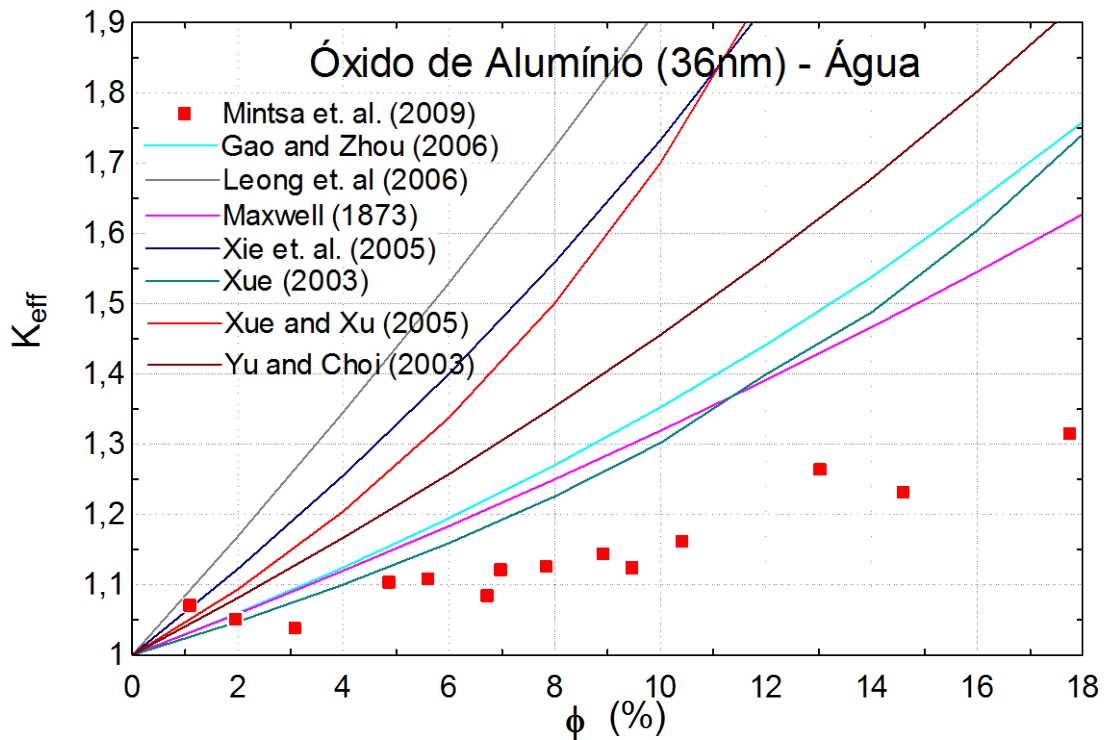


Figura 3.3 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (36 nm).

Na Fig. 3.4, nota-se que nos experimentos de Chandrasekar et al. (2010), que analisou a condutividade térmica do nanofluido de alumina, com tamanho um pouco maior (45 nm), em água, novamente a maioria das correlações superestima os resultados experimentais obtidos. Zhang (2006) analisou o mesmo nanofluido, com o mesmo tamanho de nanopartículas, para concentrações maiores, como mostrado na Fig. 3.5. Os resultados experimentais foram superestimados por todas as correlações, inclusive as mais conservadoras. Nota-se, ainda, que a temperatura, que variou entre 10 e 50°C, teve pouca influência na condutividade térmica, especialmente para baixas concentrações. Mintsá analisou este nanofluido com nanopartículas de 47 nm, também em elevadas concentrações. Novamente, todas as correlações superestimaram os dados dos experimentos, reforçando que as correlações não apresentam boas aproximações para altas concentrações. Esta comparação pode ser vista na Fig. 3.6.

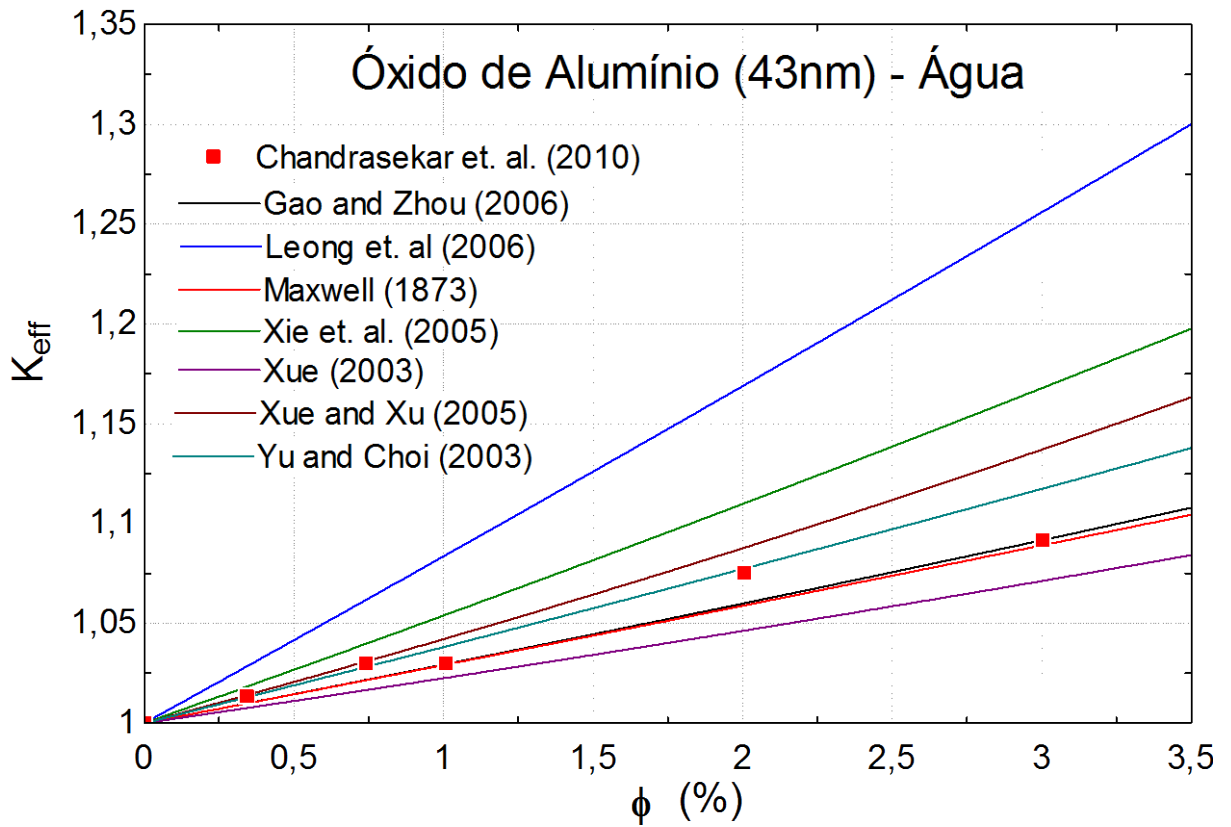


Figura 3.4 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (43 nm).

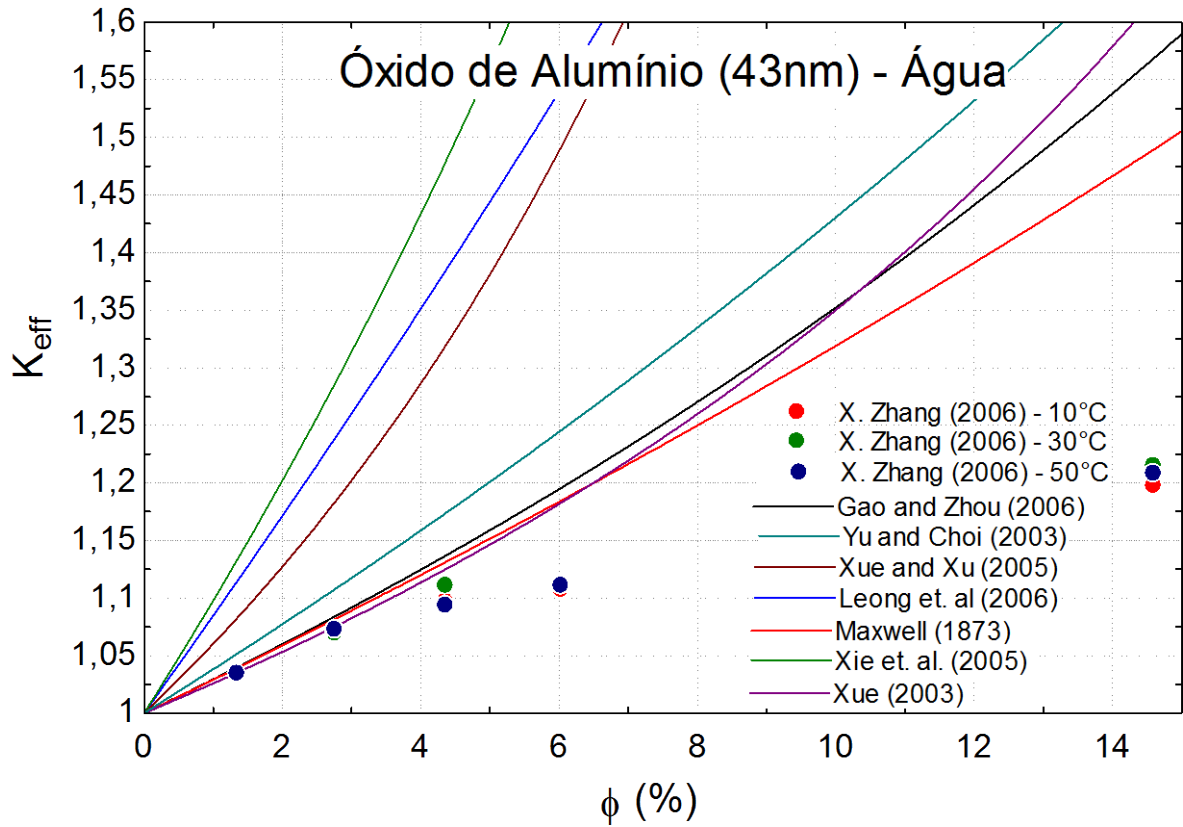


Figura 3.5 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (43 nm).

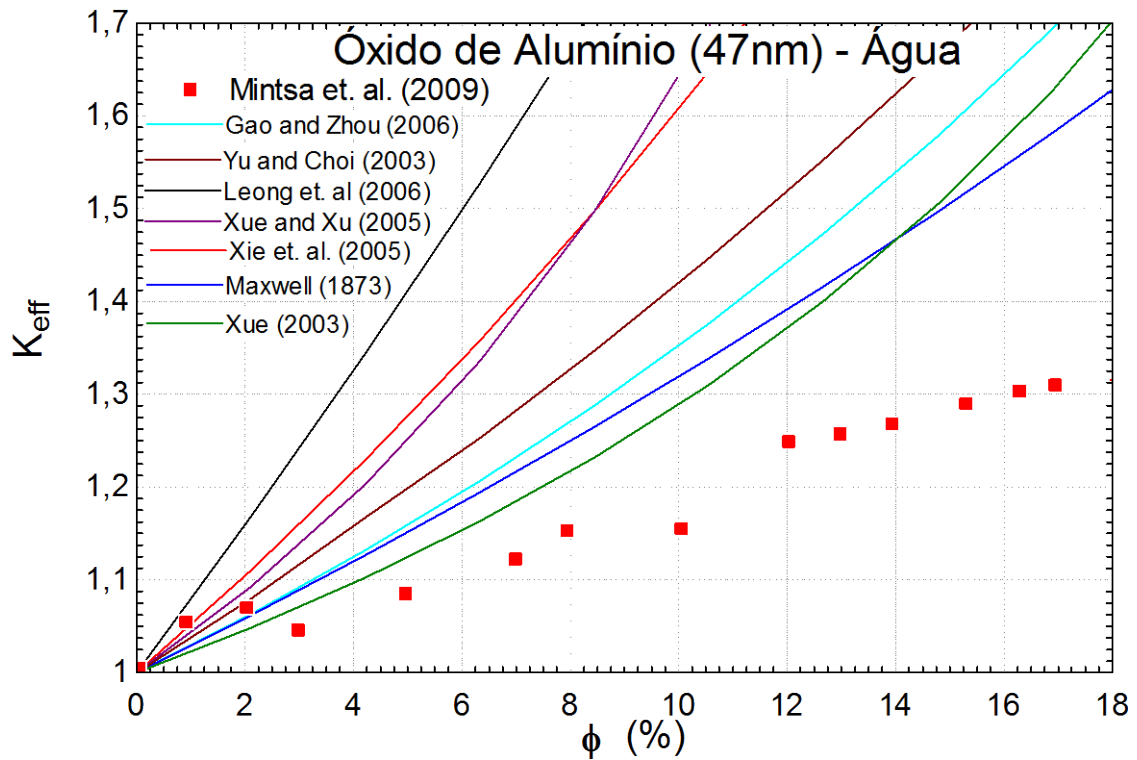


Figura 3.6 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (47 nm).

As Figs. 3.7 e 3.8 mostram comparações entre os resultados experimentais de Oh et al. (2008) para o nanofluido de alumina (45 nm) em água e etilenoglicol. Observa-se que o incremento na condutividade térmica foi maior para a água, apesar da condutividade térmica do etilenoglicol ser inferior a da água. Os resultados são inferiores ao previsto nas correlações, principalmente para o etilenoglicol.

Yoo et al. (2007) mediu a condutividade térmica para o nanofluido de alumina (48nm)-água, para baixas concentrações, e encontrou resultados inferiores ao previsto nas correlações. O modelo de Gao e Zhou (2006) foi o que mais se aproximou destes resultados, como pode ser visto na Fig. 3.9.

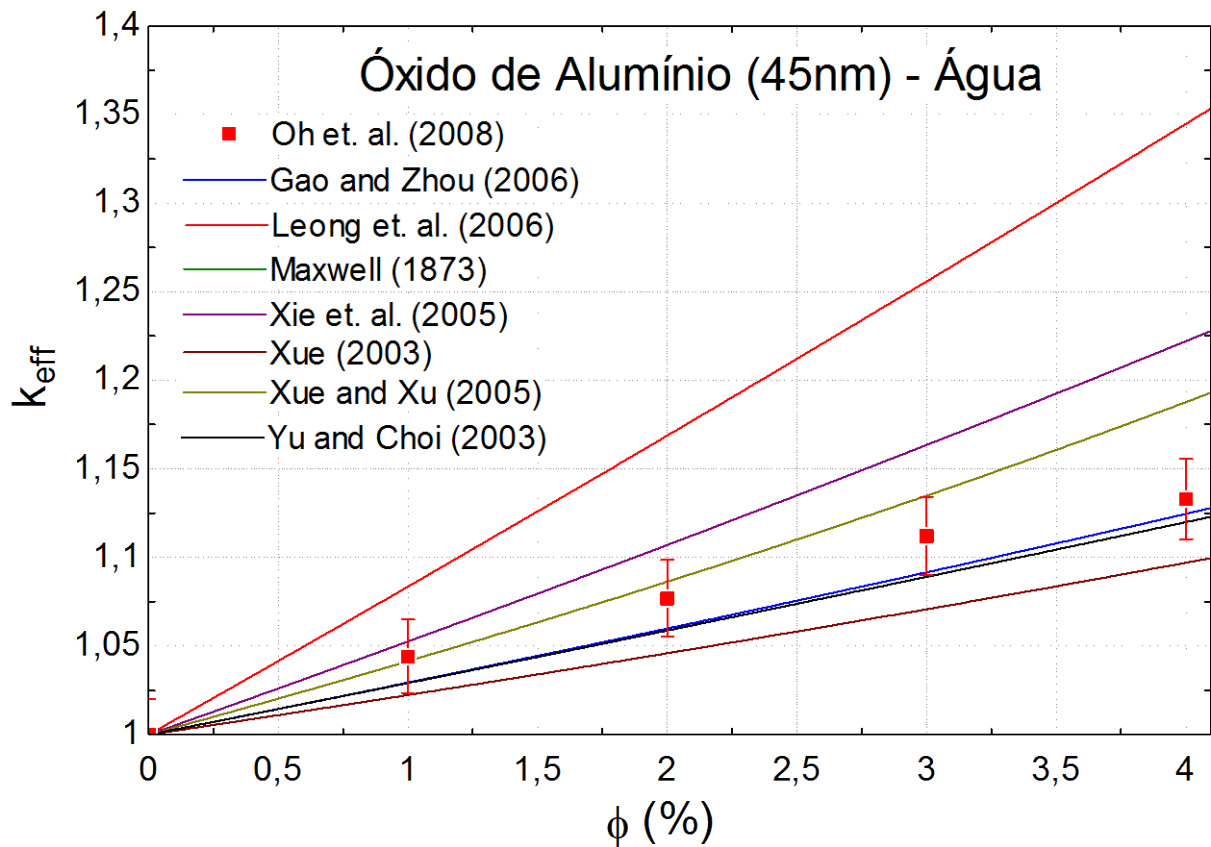


Figura 3.7 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (45 nm).

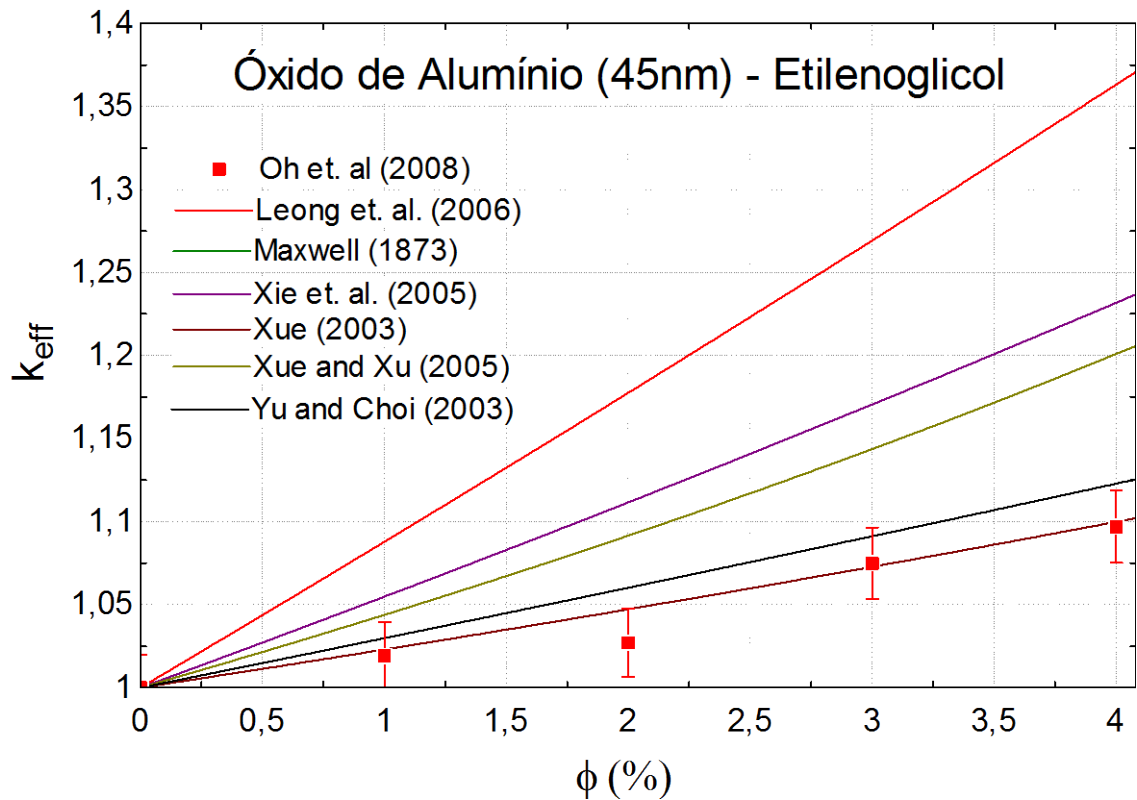


Figura 3.8 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-etilenoglicol (45 nm).

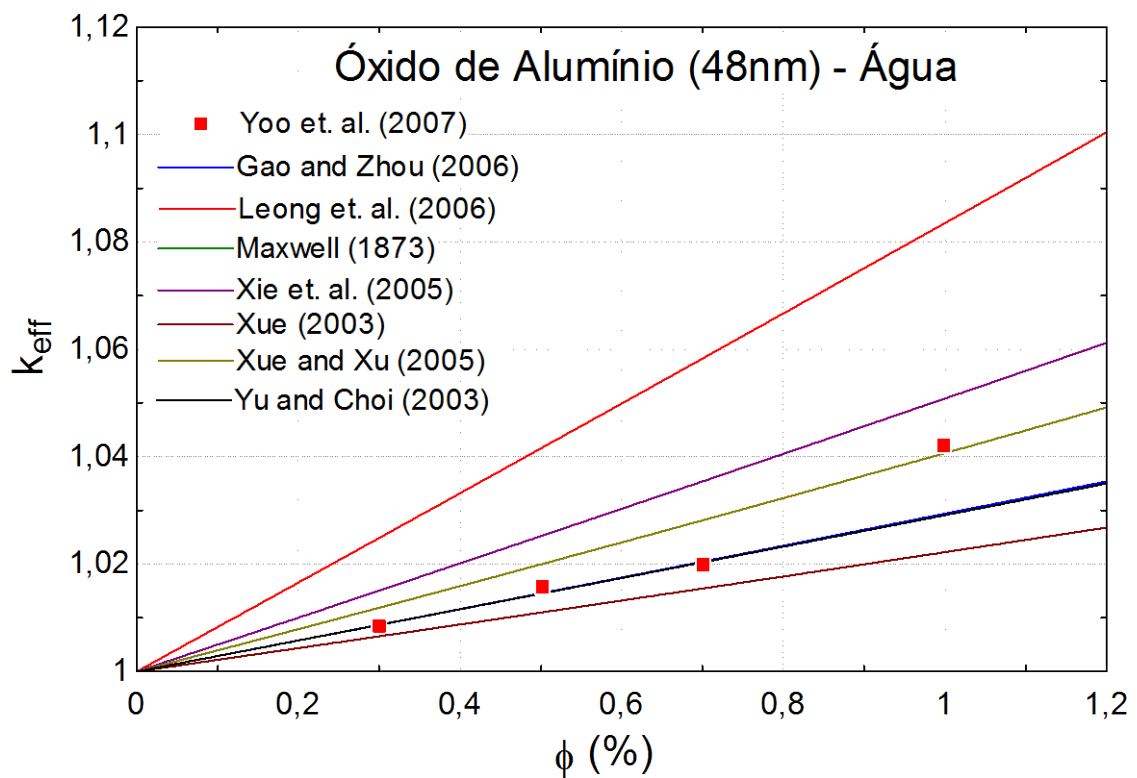


Figura 3.9 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (48 nm).

As Figs. 3.10 e 3.11 mostram os resultados experimentais de Murshed et al. (2008), para o nanofluido de alumina (80 e 150 nm) em água. A faixa de concentrações analisadas foi diferente para os dois nanofluidos, mas pode ser observado que nos dois casos os dados experimentais superam todos os modelos. Isto se deve ao fato do autor ter utilizado um surfactante para estabilizar a solução, fato que diminuiu a condutividade térmica do fluido base e tornou a condutividade relativa maior.

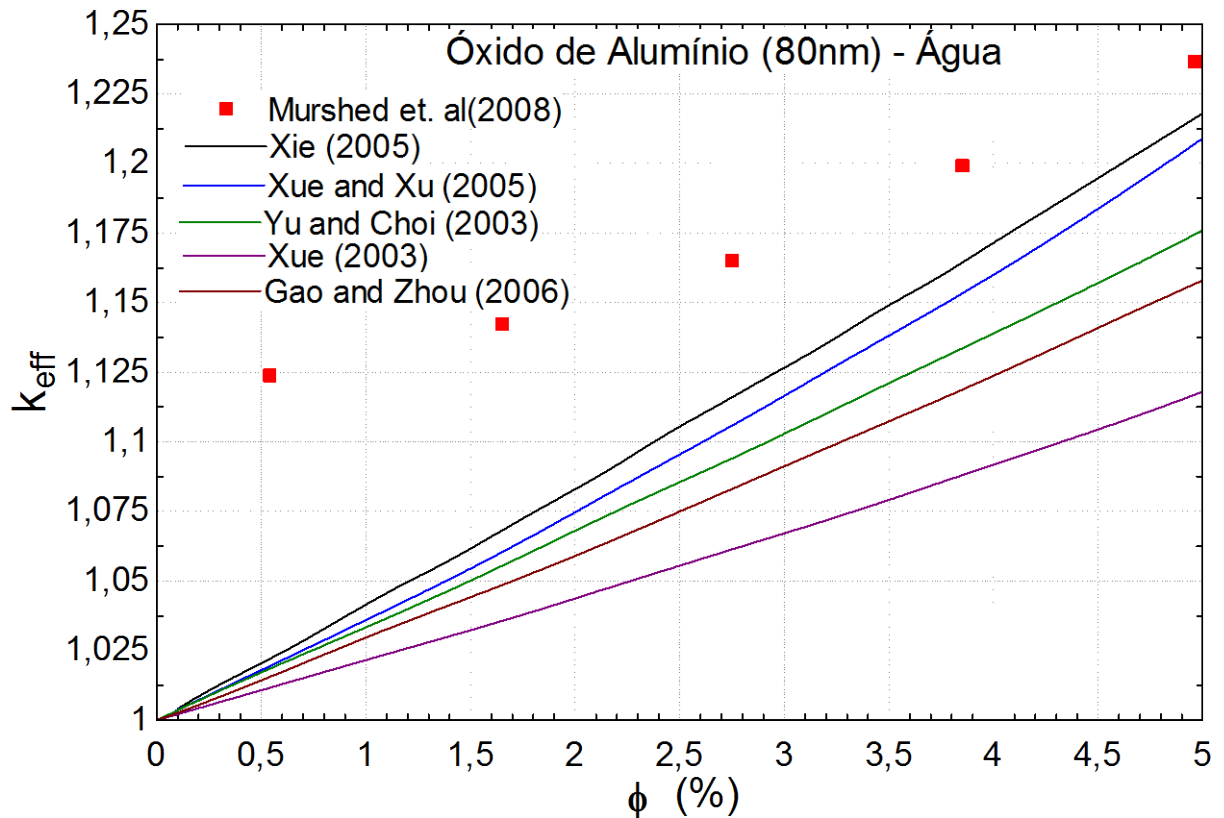


Figura 3.10 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (80 nm).

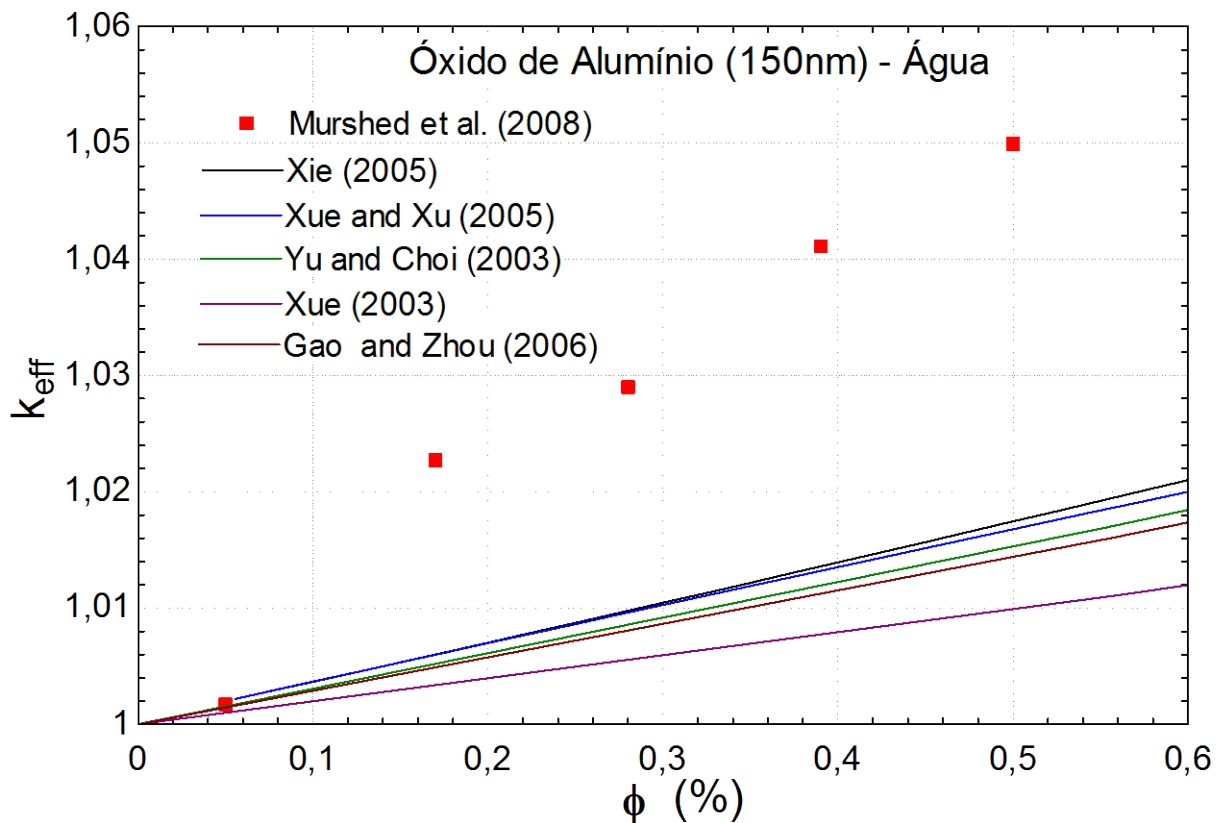


Figura 3.11 – Condutividade térmica para o nanofluido alumina-água (150 nm).

Na Fig. 3.12 é possível notar que nos experimentos de Karthikeyan et al. (2008) os dados experimentais superaram as correlações, para o nanofluido de óxido de cobre (8nm)-água, em baixas concentrações. Wang (2003) também mediu a condutividade do nanofluido de óxido de cobre em água para baixas concentrações, em seus experimentos as nanopartículas eram de 50 nm. Os resultados experimentais também foram superiores as correlações. Foi observada ainda uma queda na condutividade quando a concentração variou de 0,4 para 0,5 %, fato que é explicado devido a não homogeneidade dos nanofluidos e a existência de aglomerações. A comparação pode ser vista na Fig. 3.14.

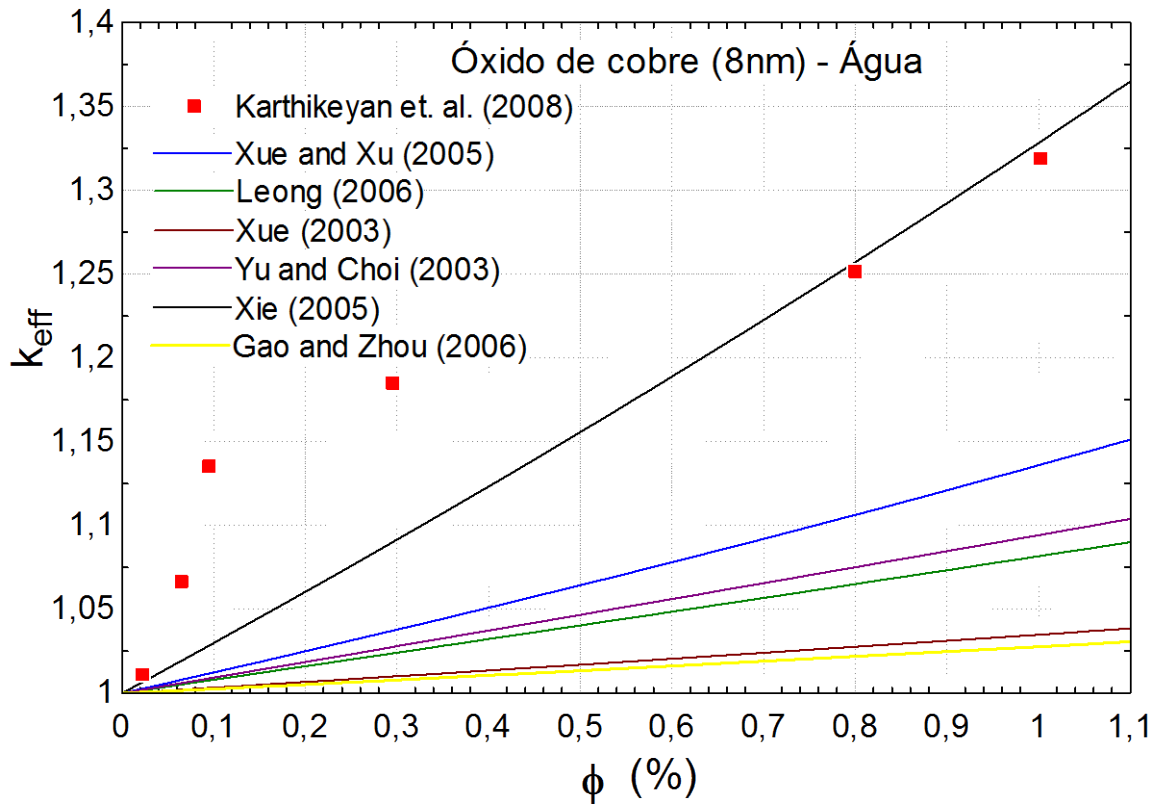


Figura 3.12 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (8 nm).

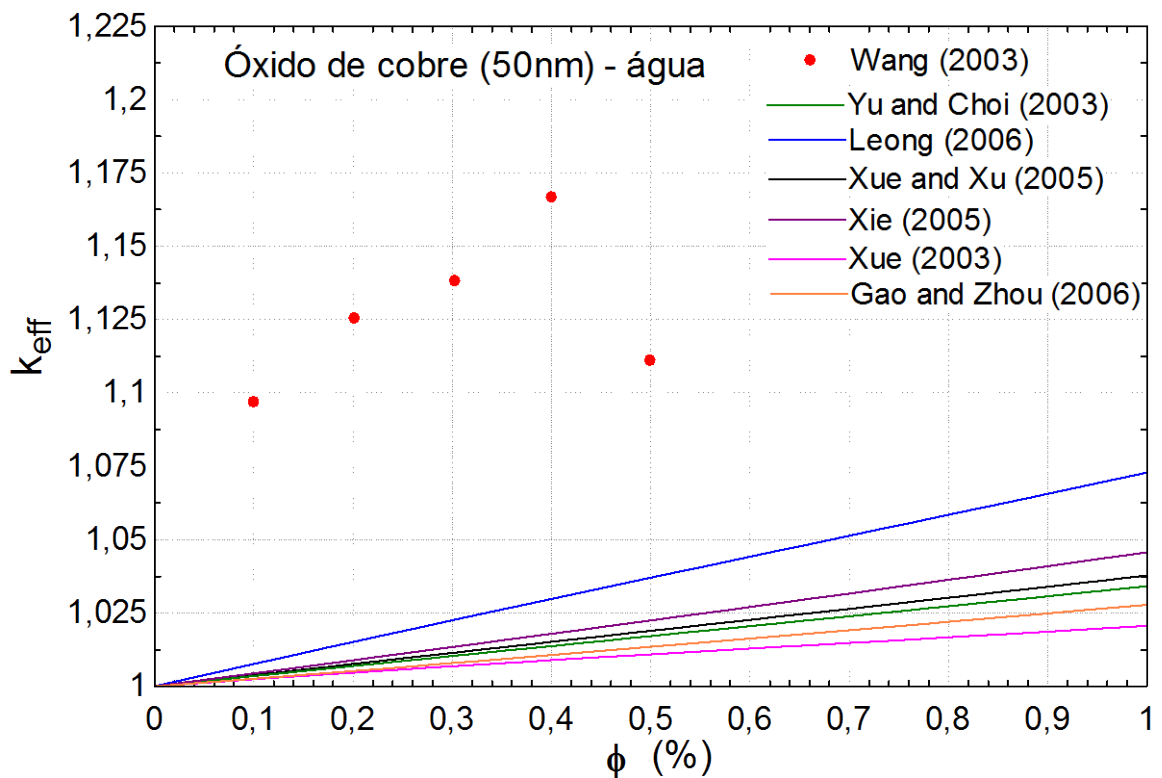


Figura 3.13 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (50 nm).

Mintsa et al. (2009) também analisou a condutividade térmica do nanofluido de óxido de cobre-água, para partículas de 29 nm, em concentrações elevadas. Na faixa de concentrações analisada, as correlações superestimaram os resultados experimentais, especialmente nas concentrações mais elevadas, como mostrado na Fig. 3.14. Zhang et al. (2006) analisou o efeito da concentração e temperatura para o nanofluido de óxido de cobre (33 nm)-água, para concentrações de até 5%. Na Fig. 3.15 pode-se observar que os resultados também foram inferiores às correlações. A temperatura apresentou pouca influência na condutividade, e não foi possível estabelecer uma tendência para este fator.

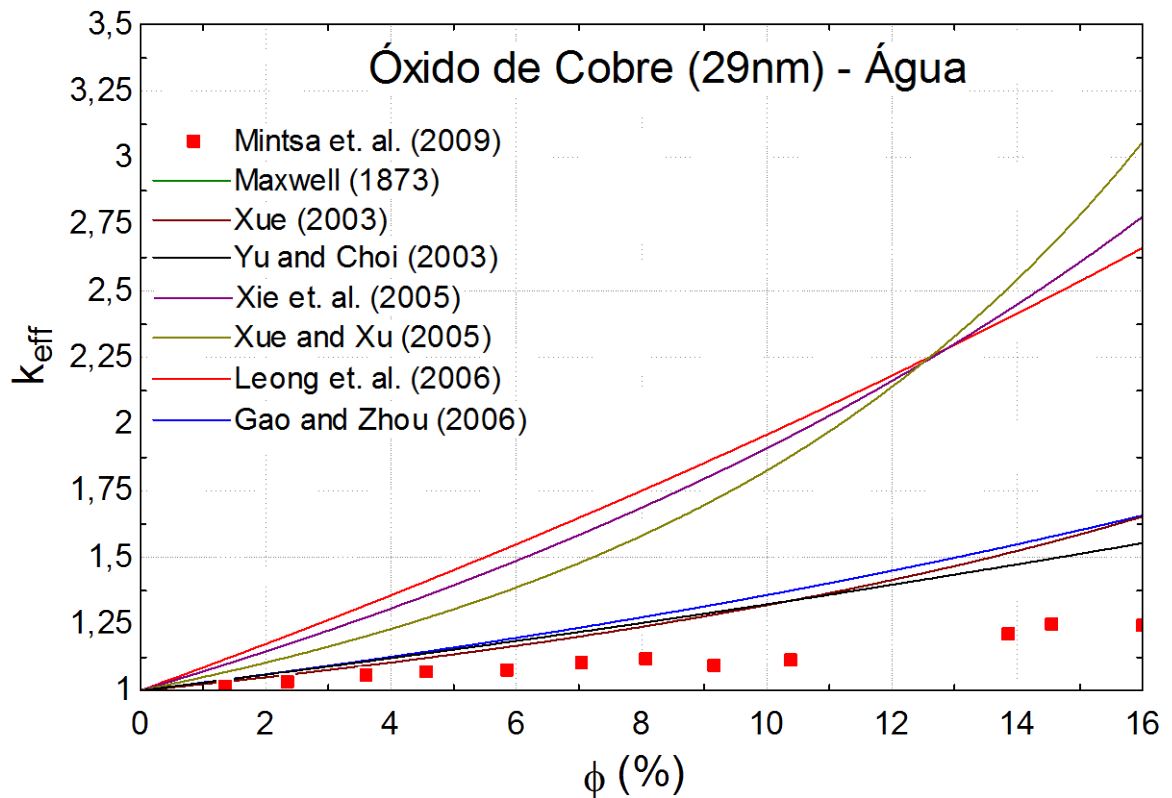


Figura 3.14 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (29 nm).

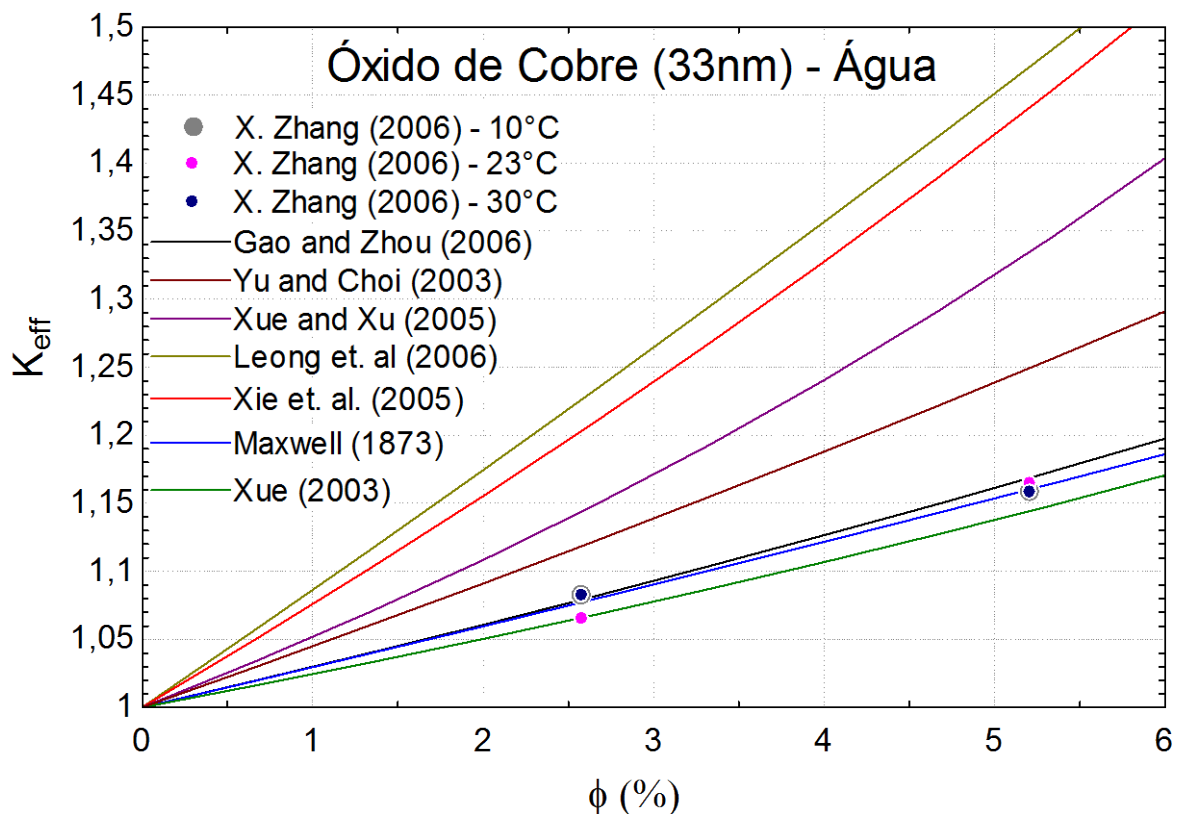


Figura 3.15 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água (33 nm).

Nas Figs. 3.16 e 3.17, podem ser visualizadas, para o nanofluido de óxido de titânio em água, comparações entre as correlações e os experimentos de Duangthongsuk (2010), que utilizou partículas de 21 nm, e Yoo et al. (2007), onde as nanopartículas eram de 25 nm. Observa-se que os incrementos obtidos por Yoo (2007) são maiores, e seus resultados superam o previsto pelas correlações. O incremento observado por Duangthongsuk (2010) é mais discreto, porém ainda superior a maioria das correlações.

Zhang et al. (2006) analisou a condutividade para este nanofluido em concentrações um pouco maiores, e para nanopartículas de 40 nm. Os resultados foram superiores ao previsto pelos modelos, como visto na Fig. 3.18, e a temperatura apresentou uma ligeira influência no valor da condutividade térmica, porém com tendências contraditórias para diferentes concentrações. Enquanto para 0,6% a maior temperatura forneceu a maior condutividade, para 2,5% o maior incremento foi observado para a menor temperatura analisada.

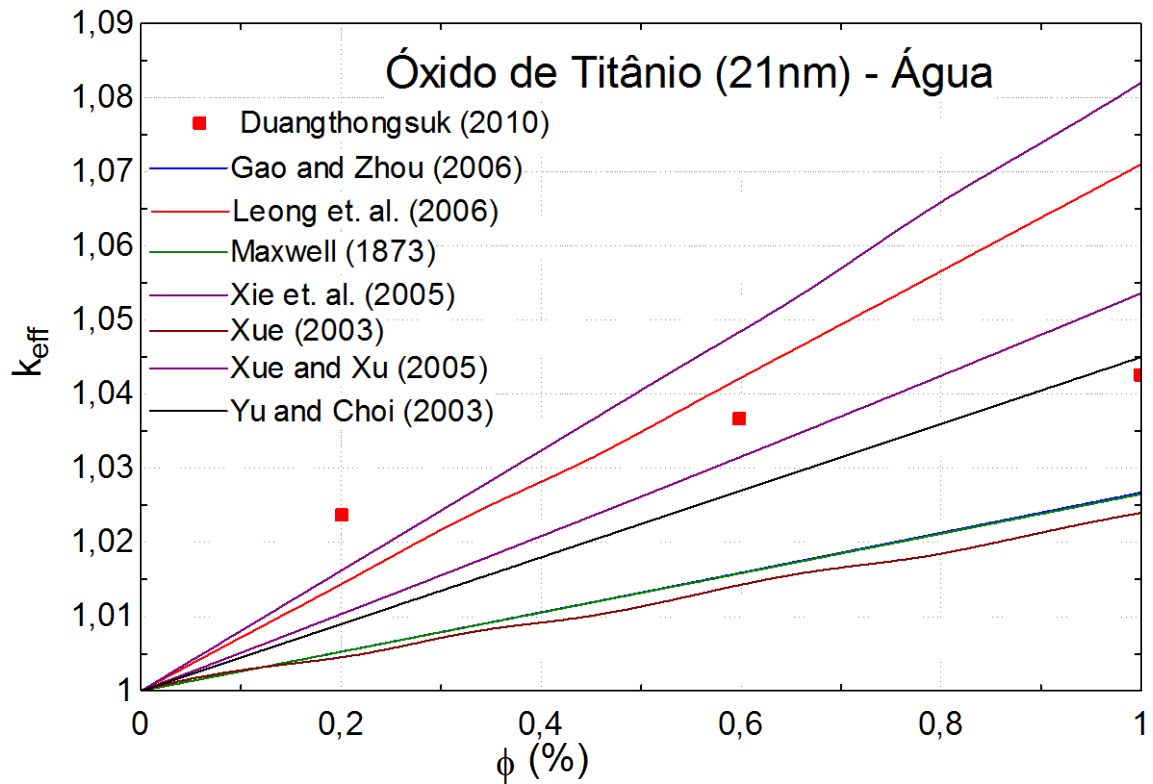


Figura 3.16 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (21 nm).

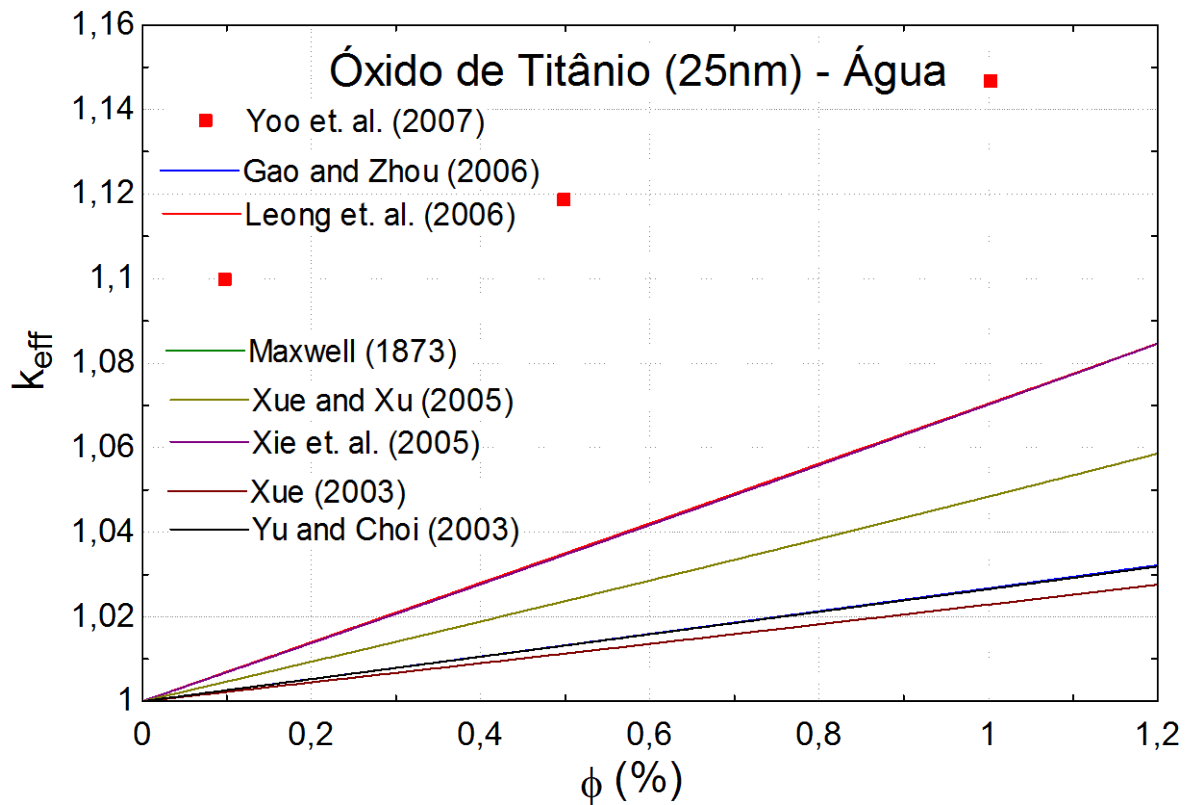


Figura 3.17 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (25 nm).

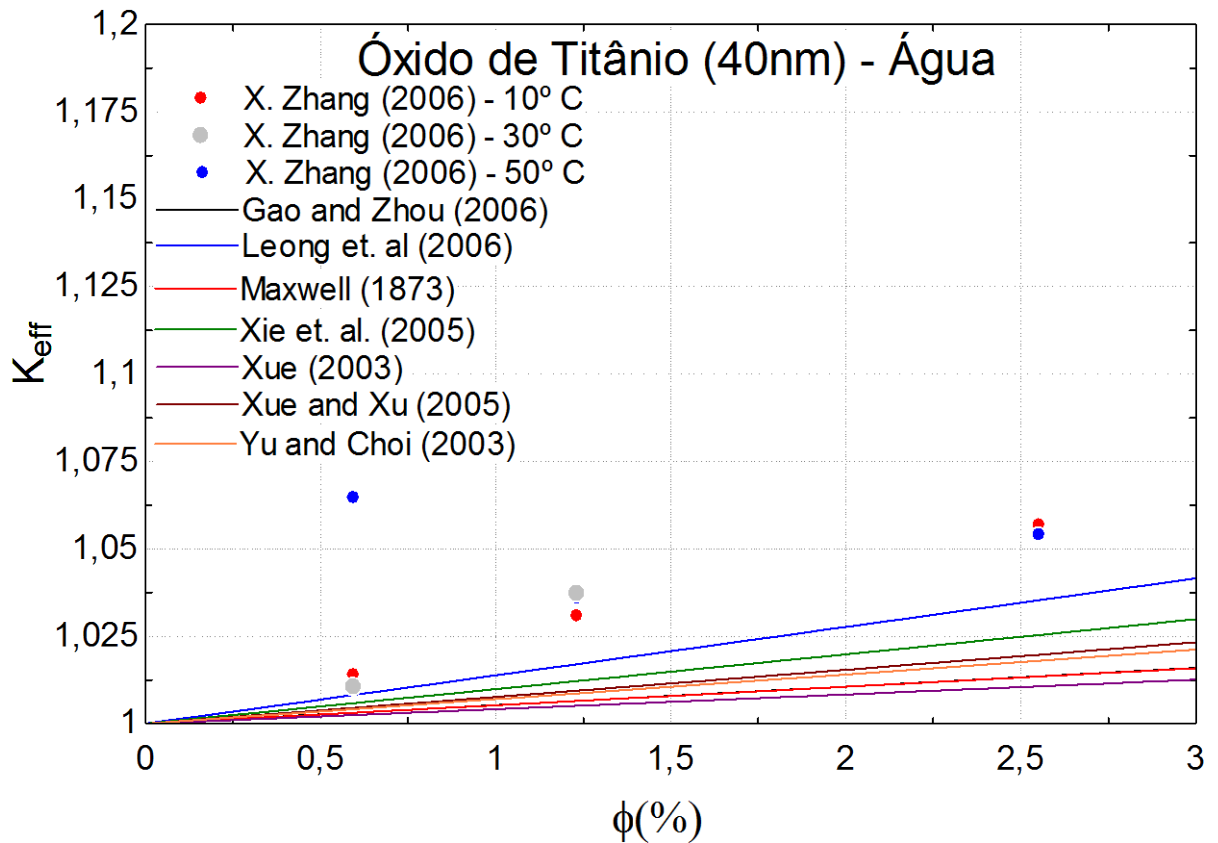


Figura 3.18 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de titânio-água (40 nm).

Para o nanofluido de óxido de zinco em etilenoglicol, os resultados experimentais encontrados na literatura se apresentam intermediários entre as correlações. Na Fig. 3.19, que mostra os resultados de Moosavi et al. (2010), que utilizou nanopartículas de 50 nm, nota-se esta tendência. Os resultados de Yu et al. (2009), Fig. 3.20, mostram incrementos ligeiramente superiores aos de Moosavi et al. (2010). Seus resultados também são superestimados por algumas correlações enquanto subestimado por outras.

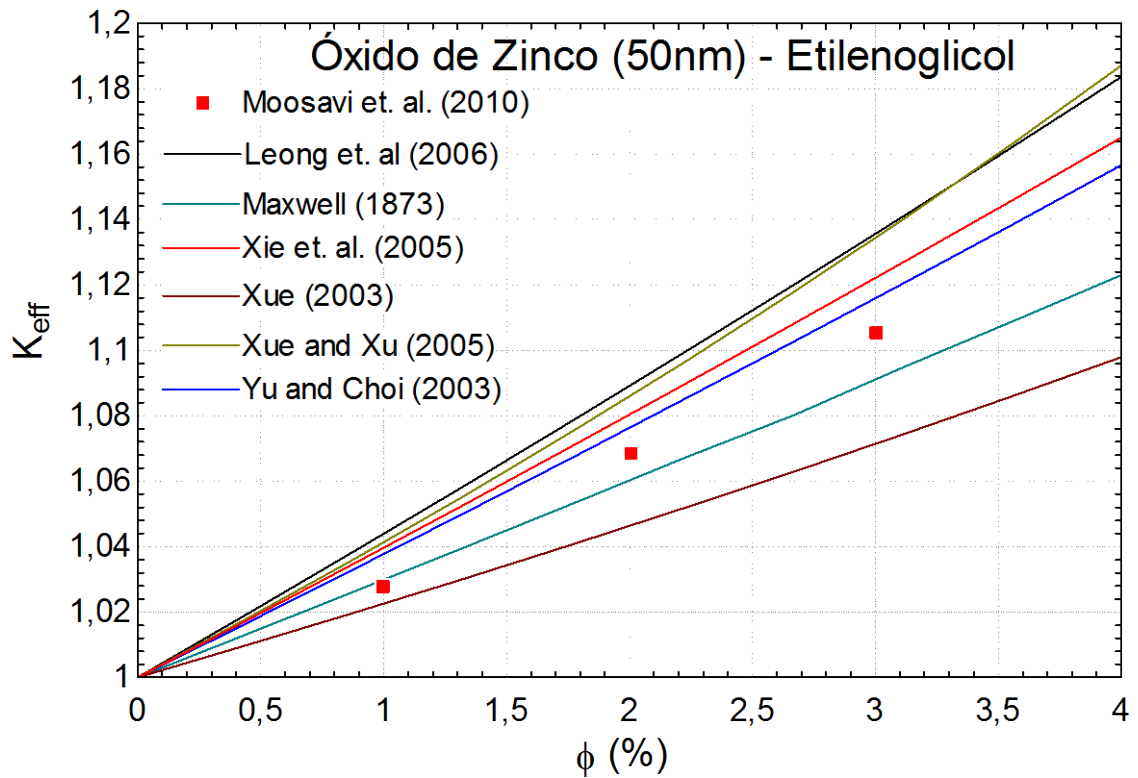


Figura 3.19 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de zinco-etilenoglicol (50 nm).

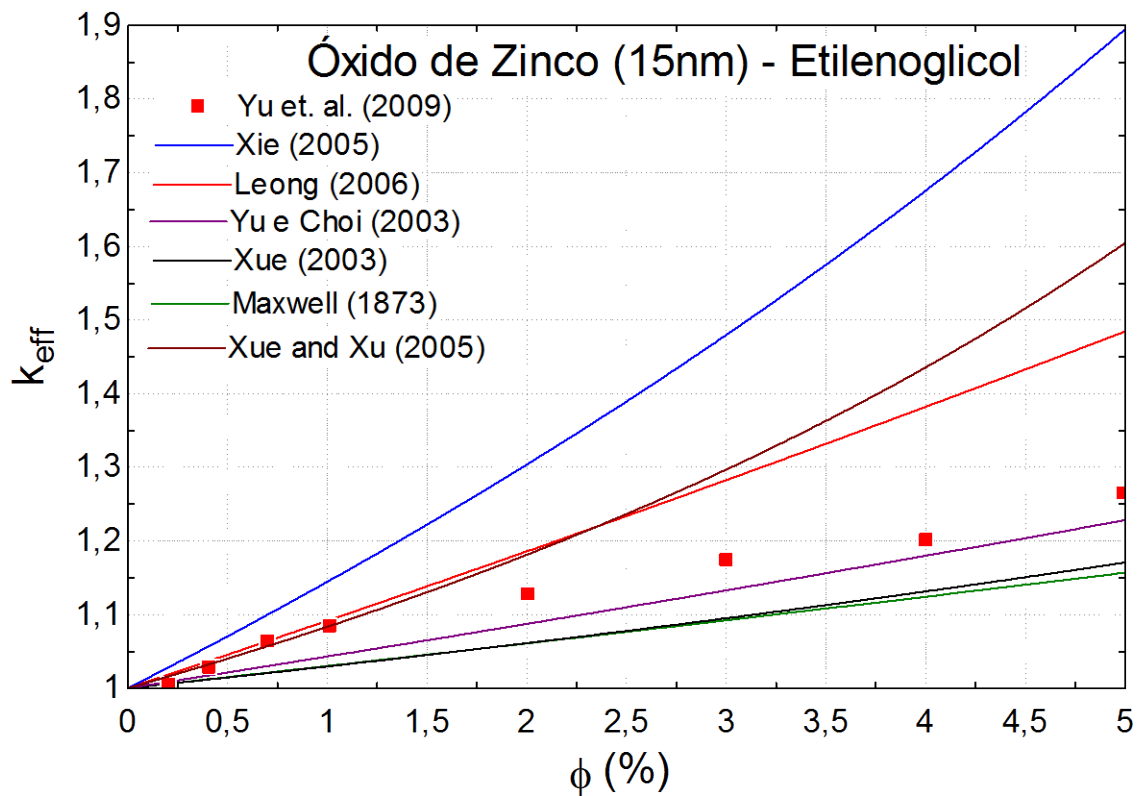


Figura 3.20 – Condutividade térmica para o nanofluido óxido de zinco-etilenoglicol (15 nm).

A Fig. 3.21 mostra a comparação entre os experimentos de Lee et al. (2011) e correlações para o nanofluido de carbeto de silício (100 nm) em água. Foi medida a condutividade do nanofluido para concentrações baixas e médias, e os resultados são superestimados pela maioria das correlações.

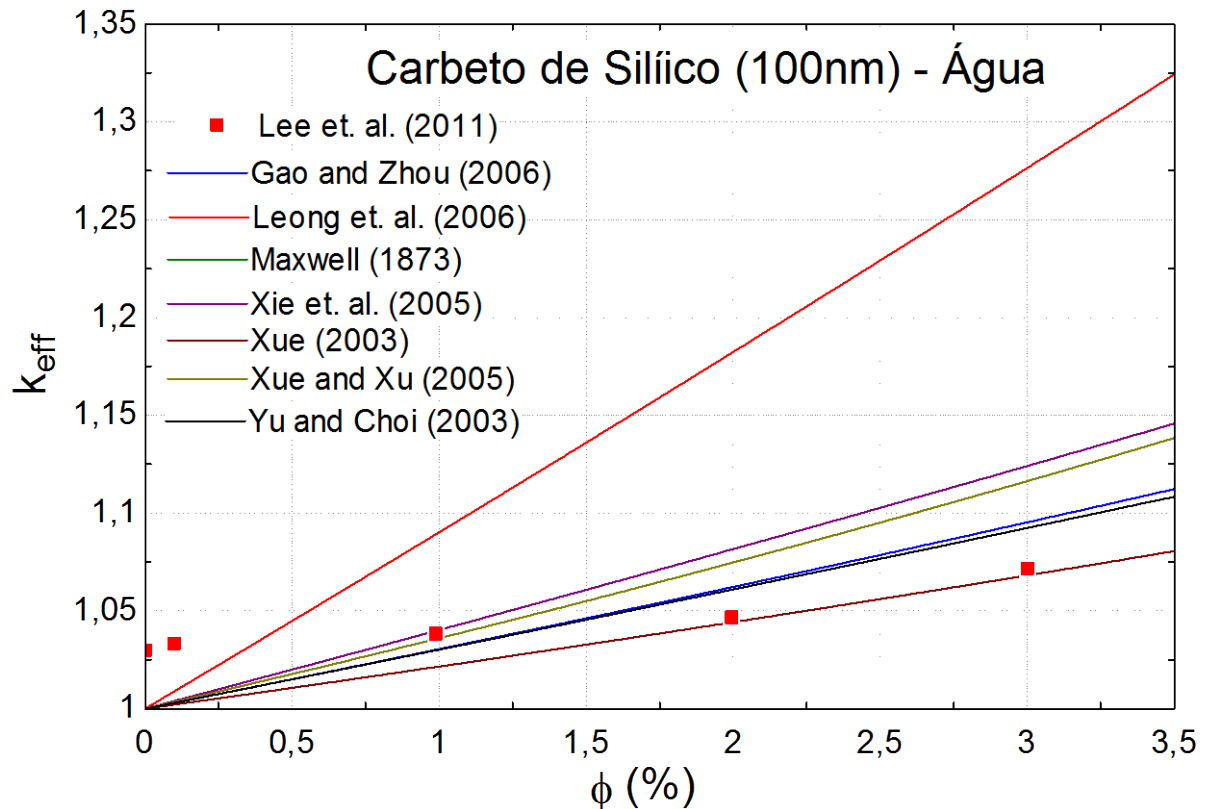


Figura 3.21 – Condutividade térmica para o nanofluido carbeto de silício-água (50 nm).

Das figuras, pode-se observar que não há uma tendência de aproximação de correlações aos resultados experimentais. Em alguns casos, as correlações subestimam os dados experimentais, como nos experimentos de Jang et al. (2008), Wang (2003), Murshed et al. (2008), enquanto em outros superestima os experimentos, como no caso dos testes de Lee e Mudawar (2007), Chandrasekar et al. (2010). Além disso, cada dado experimental é melhor aproximado por uma correlação diferente. Nota-se, ainda, que as correlações que prevêm os maiores incrementos na condutividade térmica para baixas concentrações são as de Leong (2006) e Xie (2005), enquanto as mais conservadoras são as de Maxwell (1873) e Xue (2003). Nos poucos experimentos onde foram analisadas elevadas concentrações, como nos de Mintsa et al. (2009), a condutividade térmica dos nanofluidos se elevou apenas moderadamente, sendo inclusive superestimada por todas as correlações.

3.2.2 Comparação entre resultados experimentais por tipo de nanofluido

Ao comparar resultados experimentais, também é possível observar discrepâncias entre os resultados. Nas figuras 3.22 a 3.24, comparações entre os experimentos de acordo com a natureza do nanofluido.

Para os nanofluidos de alumina em água, como mostrado na Fig. 3.22, de uma forma geral, as menores nanopartículas implicam em maiores incrementos na condutividade térmica do fluido base, apesar de existirem alguns experimentos com resultados fora desta tendência. Deve-se ressaltar que nos experimentos de Murshed et al. (2008) foi utilizado surfactante, o que reduziu a condutividade do fluido base e pode ser a causa de uma condutividade relativa tão elevada.

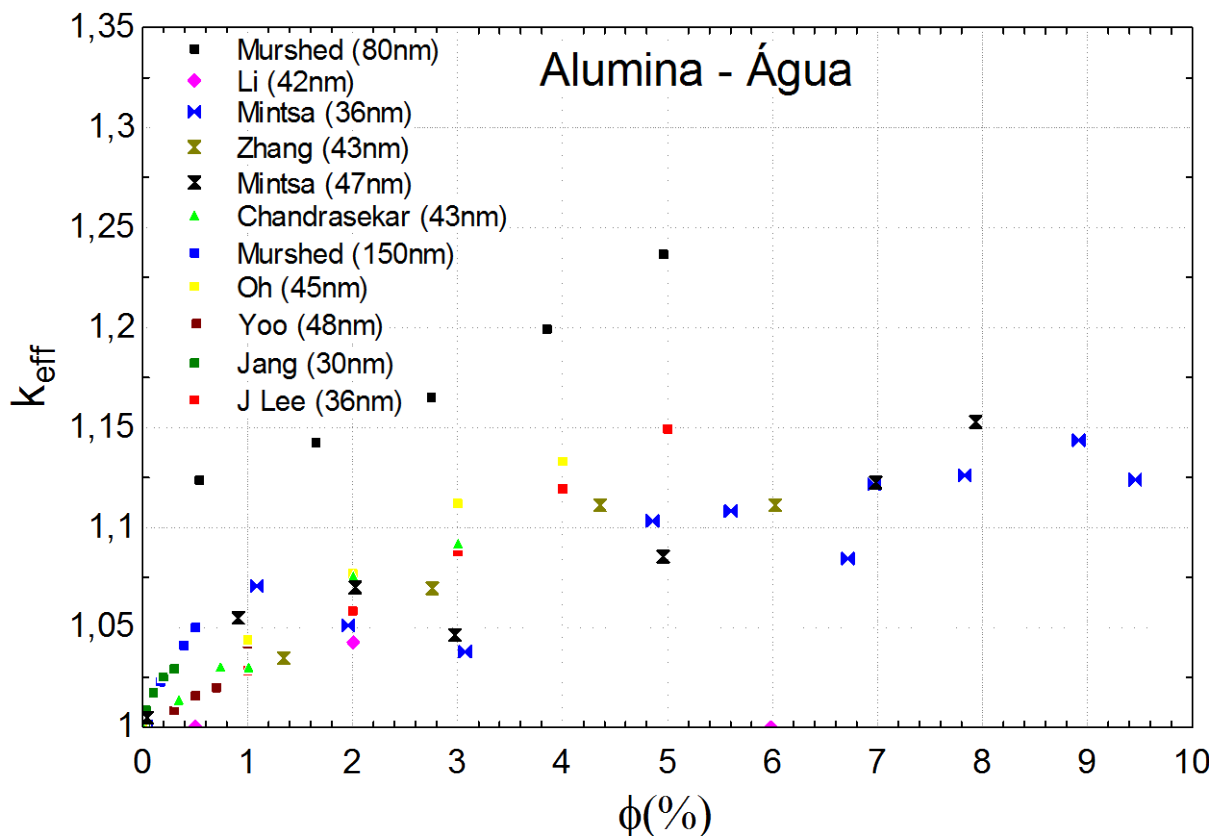


Figura 3.22 – Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido alumina-água.

Tendência contraditória também pode ser observada para o nanofluido de óxido de titânio em água. Na Fig. 3.23, é possível observar que os menores incrementos na

condutividade térmica foram observados para as menores nanopartículas, 40 nm, enquanto os maiores incrementos foram observados para as nanopartículas de tamanho intermediário, 25 nm, não sendo possível estabelecer uma tendência para a influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica deste nanofluido.

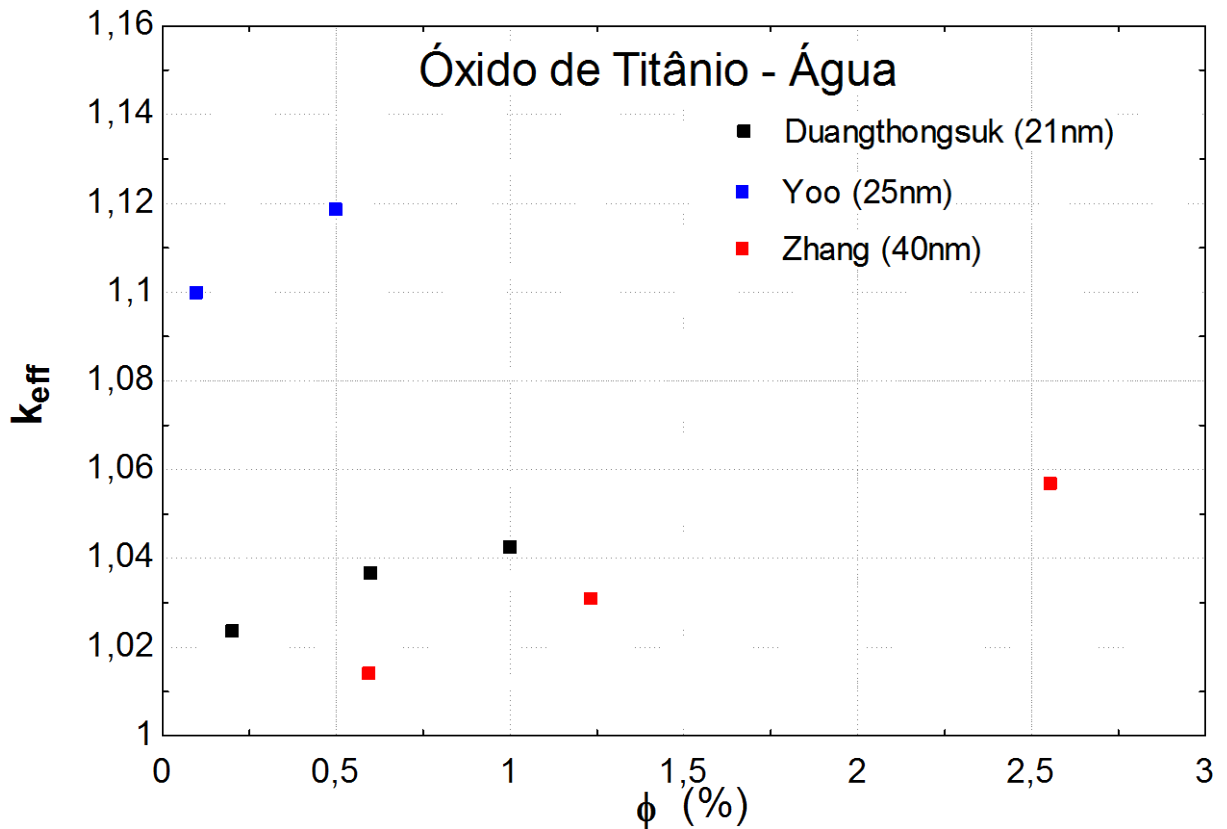


Figura 3.23 – Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido óxido de óxido de titânio-água.

Para o nanofluido de óxido de cobre em água, tendências contraditórias também são encontradas para o tamanho das nanopartículas. O maior incremento foi encontrado por Karthikeyan (2008), que utilizou nanopartículas de 8 nm. Porém, para o maior tamanho de nanopartículas analisadas, 50 nm, os incrementos observados foram superiores aos nanofluidos com nanopartículas menores, com exceção as de 8 nm. Para as nanopartículas de 29 e 33 nm, foram encontrados os menores incrementos na condutividade térmica, como mostrado na Fig. 3.24.

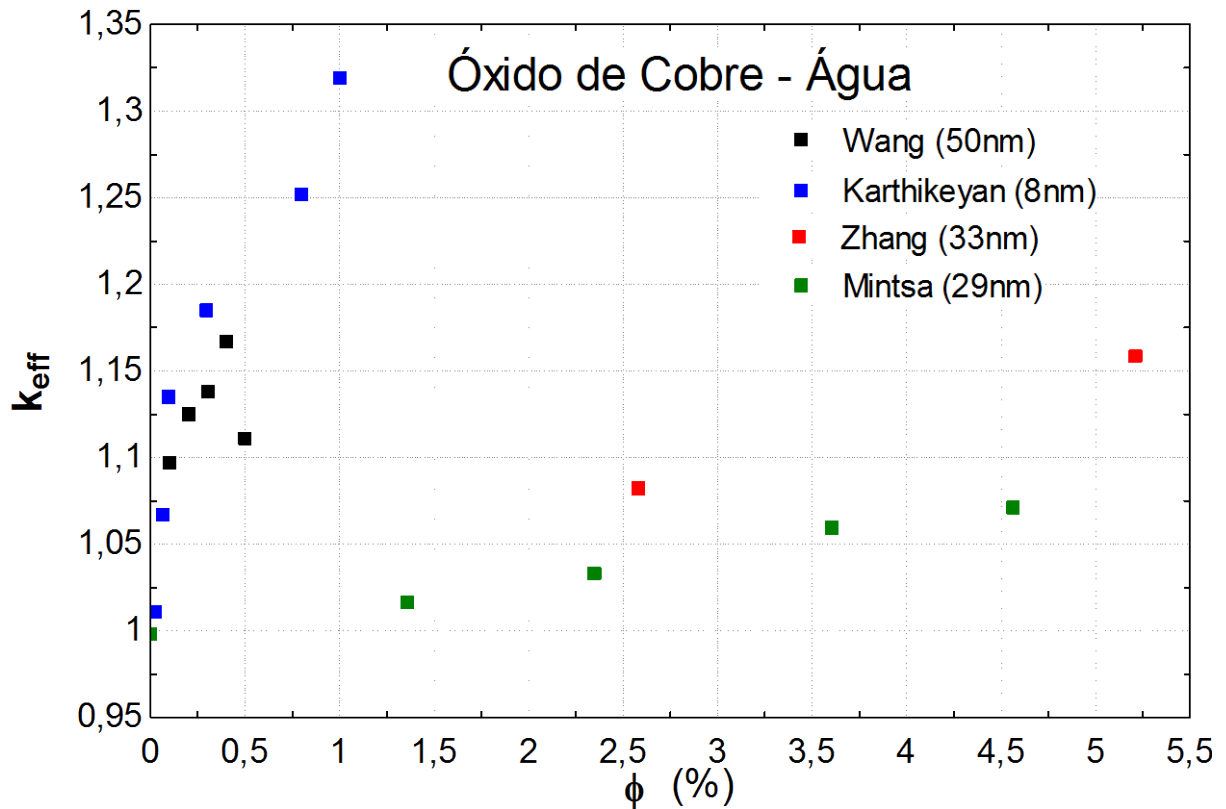


Figura 3.24 – Dados experimentais de condutividade térmica para o nanofluido óxido de cobre-água

Vale a pena destacar os resultados experimentais obtidos por Jabardo (2012), que investigou a condutividade térmica de nanofluidos de óxido de titânio em água, em temperaturas de 20 a 80°C. Pode ser observado na Fig. 3.25 que ao longo do tempo a condutividade térmica do nanofluido teve alterações significativas, sendo que em 32 dias aumentou mais de 5%, realizando a mesma medição. Em seu estudo, a condutividade do fluido base foi medida antes de cada medição da condutividade do nanofluido. A Fig. 3.26 mostra que mesmo a condutividade térmica relativa teve incremento com o tempo, e não foi apenas variação nas medidas realizadas pelo método do fio quente. Tal fato pode ser explicado pelo fato de existir uma influência da concentração de aglomerações nas propriedades nos nanofluidos (Prasher, 2006), e a medida que passou o tempo as aglomerações foram se acentuando.

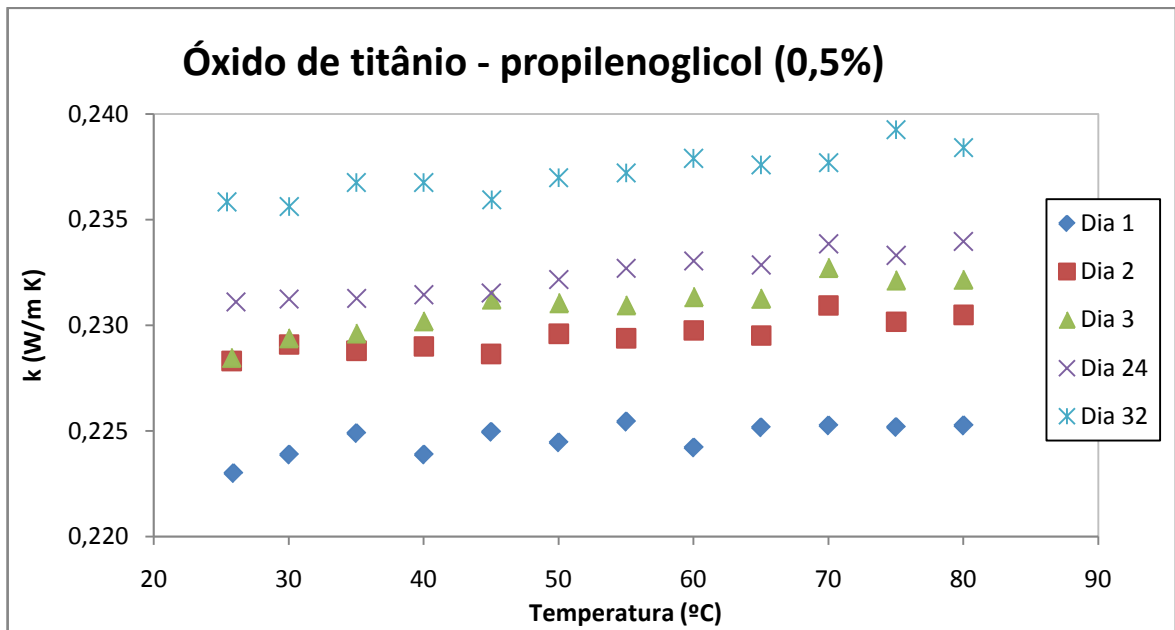


Figura 3.25 – Resultados experimentais de Jabardo (2012).

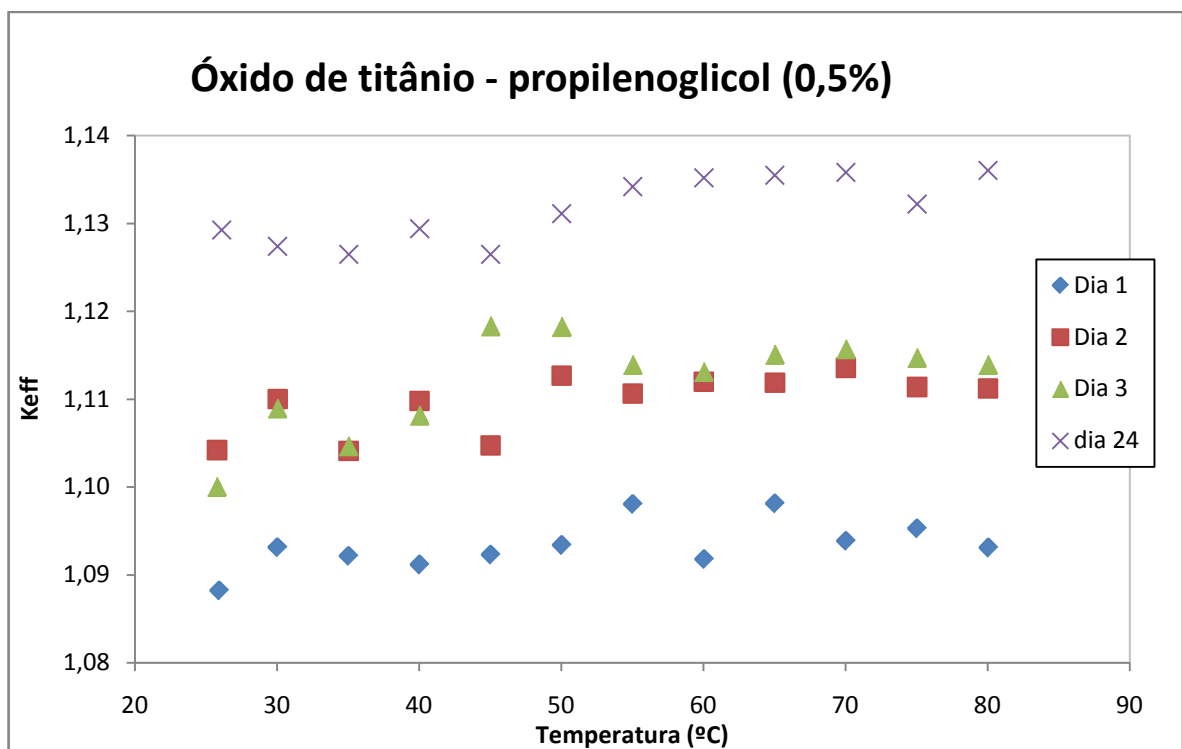


Figura 3.26 – Resultados experimentais de Jabardo (2012).

3.2.3 Medição da condutividade térmica por diferentes instituições

Tendo em vista os aumentos anômalos apresentados por alguns autores e a grande discrepância dos resultados, Buongiorno et al. (2009) propuseram um estudo de referência (“benchmark”) para determinar a condutividade térmica de diversos nanofluidos. A proposta foi preparar as amostras de nanofluidos em um único laboratório, e distribuir para que diversos laboratórios de universidades medissem a condutividade térmica e os resultados fossem comparados. Para evitar resultados forçados, as amostras foram distribuídas sem informação alguma, ou seja, para cada laboratório foi enviado o fluido base e o nanofluido, mas os cientistas não sabiam de quais materiais se tratava. Apenas depois de mostrados os valores de condutividade térmica medidos por todos os laboratórios foram revelados de quais nanofluidos se tratava. Foram analisados nanofluidos a base de alumina, ouro, óxido de silício, entre outros. Em anexo encontra-se uma tabela com as universidades participantes do projeto. As Figuras 3.27 a 3.34 mostram os resultados obtidos no referido estudo.

Aumentos discretos podem ser observados na Fig. 3.27, para o nanofluido de alumina (cilíndrica) em água (1%). A maioria das instituições obtiveram condutividades próximas a correlação de Maxwell. Já para alumina esférica, Fig. 3.28, para a concentração de 1% foi observado incremento superior ao da alumina cilíndrica, e os resultados experimentais superam a maioria das correlações. Para a concentração de 3%, Fig. 3.29, observa-se incrementos significativamente superiores a concentração de 1%. As correlações também não aproximam bem estes dados, subestimando as medições feitas pela maioria das universidades.

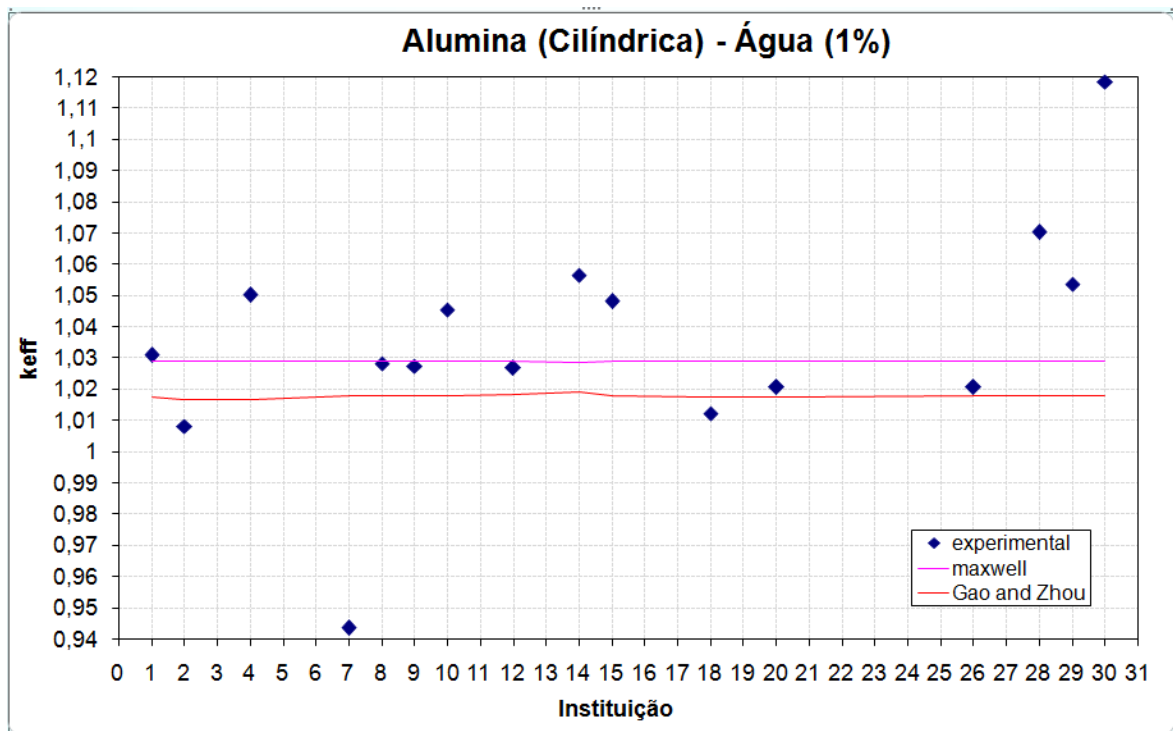


Figura 3.27 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-água (1%) e correlações

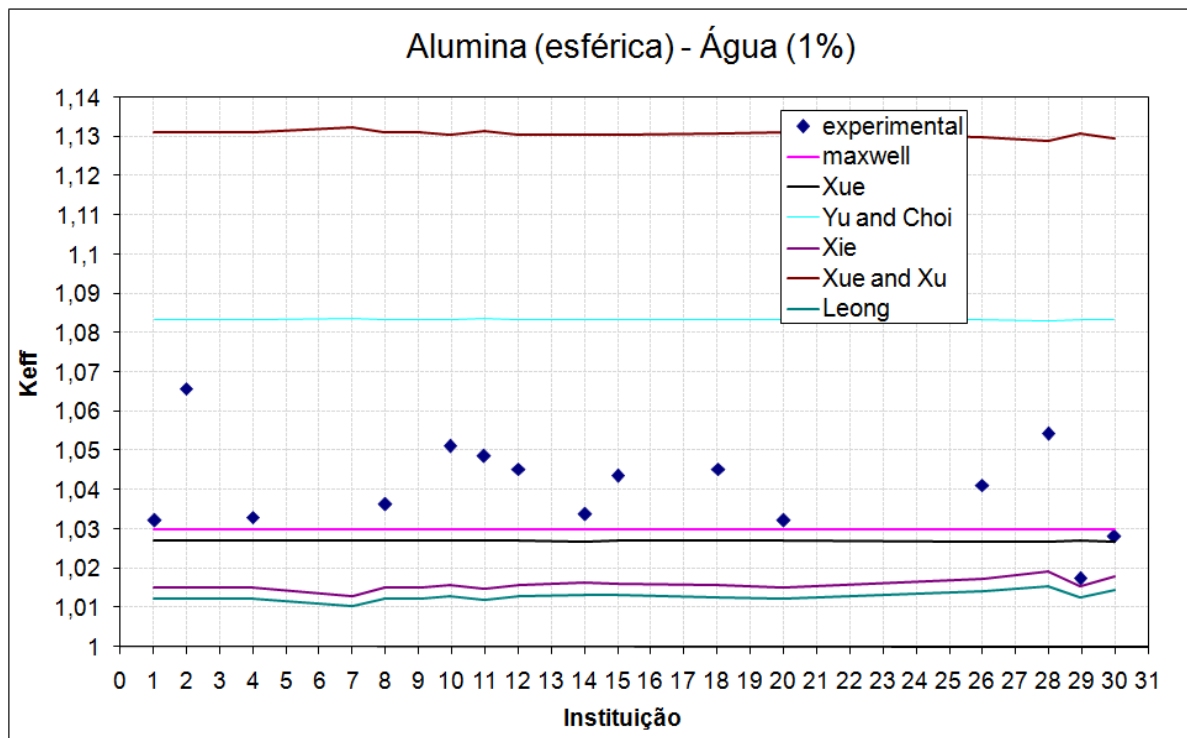


Figura 3.28 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina esférica-água (1%) e correlações

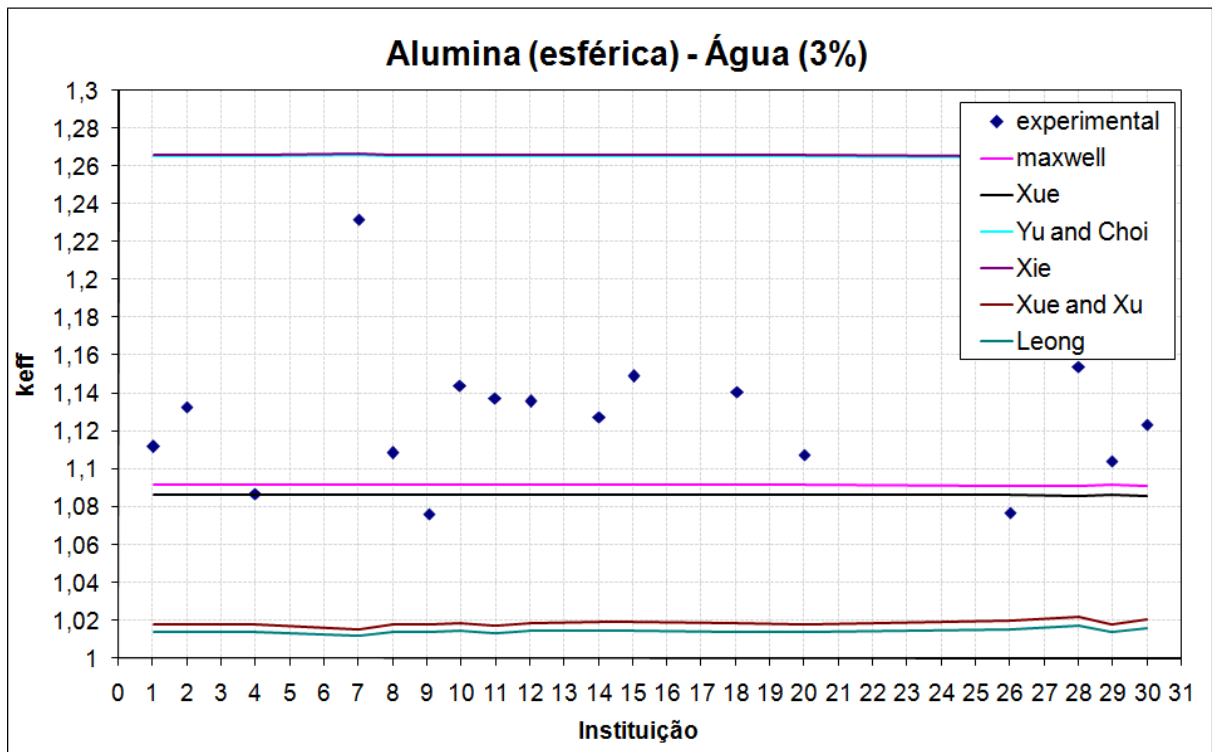


Figura 3.29 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina esférica-água (3%) e correlações

Podem ser observados aumentos significativos na condutividade térmica dos fluidos a base de “Poly-alpha-olefin” (PAO), devido a sua condutividade térmica inferior a da água, o incremento foi ainda maior, como pode ser visto nas Figs. 3.30 e 3.31. Os resultados obtidos foram superiores a correlação de Maxwell, que não aproximou bem estes resultados, principalmente para a concentração de 3%.

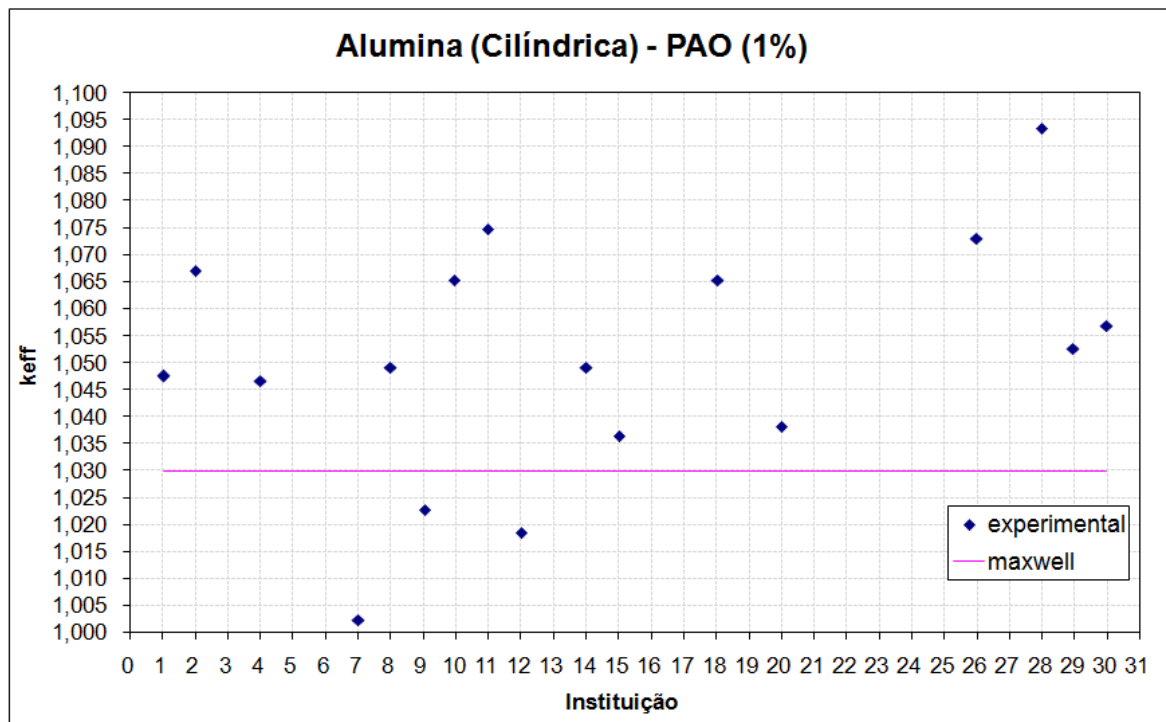


Figura 3.30 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-PAO (1%) e correlação de Maxwell (1873)

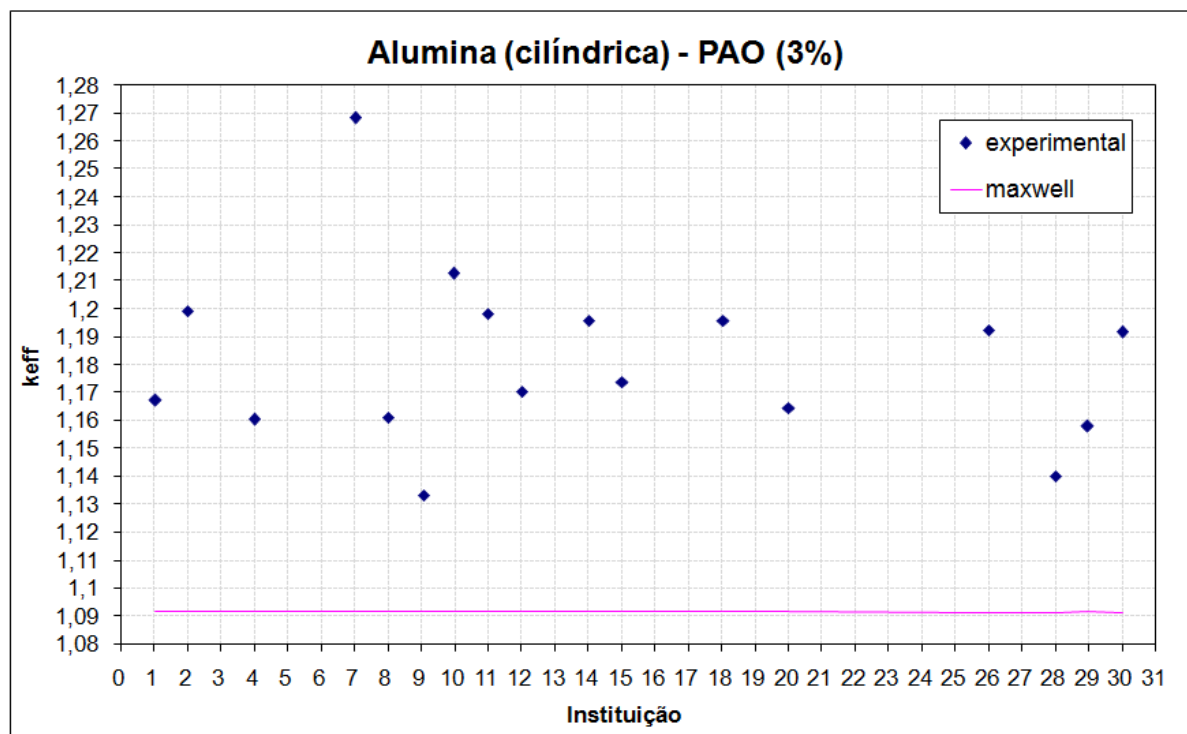


Figura 3.31 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para alumina cilíndrica-PAO (3%) e correlação de Maxwell (1873)

Para o nanofluido a base de ouro a concentração analisada foi muito pequena (0,001%), e concentrações maiores deveriam ser analisadas para verificar algum incremento significativo na condutividade térmica. Alguns resultados mostraram resultados de condutividade térmica inferiores a da própria água, fato que provavelmente se deve ao baixo incremento na condutividade para esta concentração irrisória, e erros de medição influenciaram mais que a presença de nanopartículas no fluido. A comparação pode ser vista na Fig. 3.32.

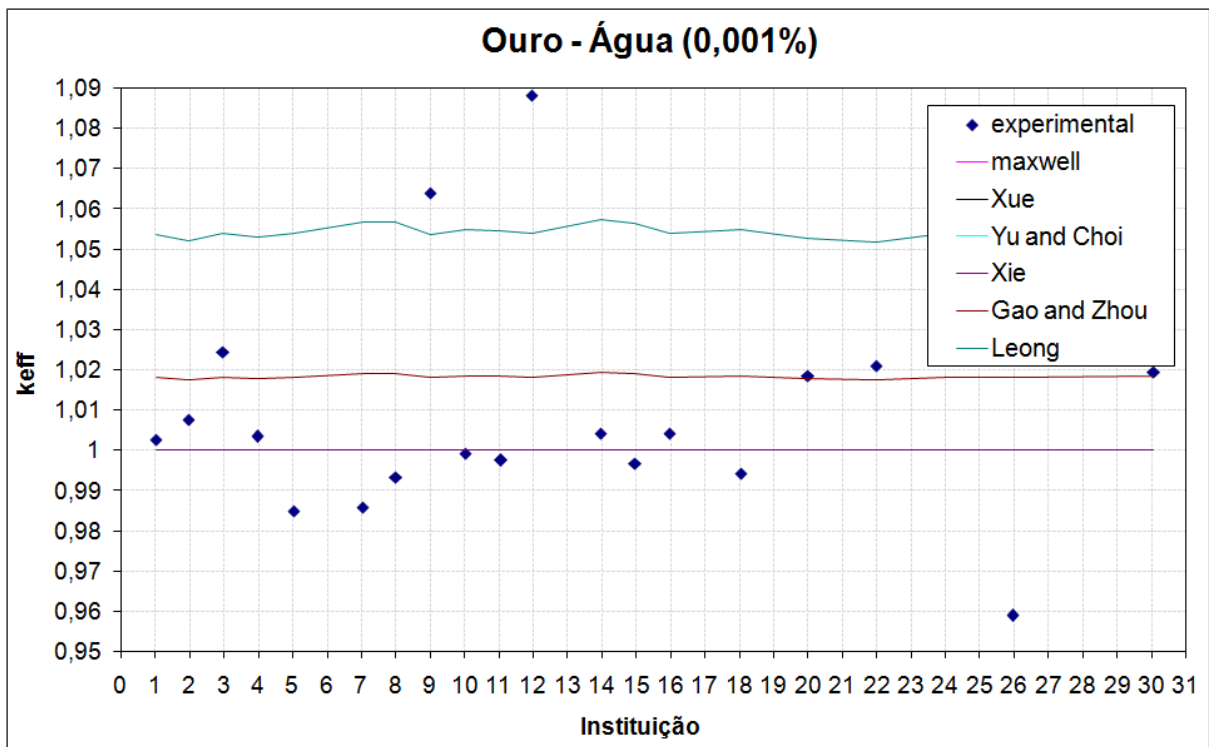


Figura 3.32 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para ouro-água (0,001%) e correlações

Para o nanofluido de óxido de silício em água, a concentração analisada foi muito elevada (31,1%). As correlações superestimaram as medições de condutividade térmica feitas pelas universidades, como se observa na Fig 3.33. Para nanopartículas de Mn-Zn-Ferrita em água, os incrementos medidos também foram inferiores ao previsto nas correlações, e para várias universidades a condutividade térmica medida foi inferior a da própria água. A concentração utilizada foi de 0,17%, como visto na Fig. 3.34.

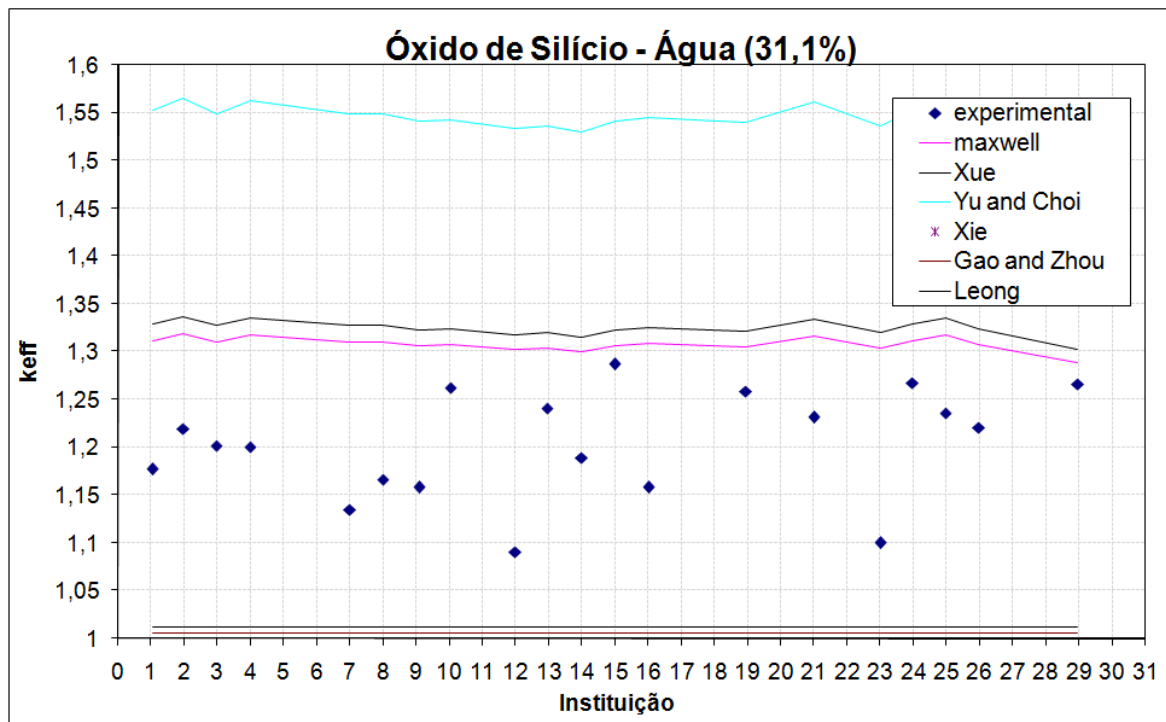


Figura 3.33 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para óxido de silício-água (31,1%) e correlações

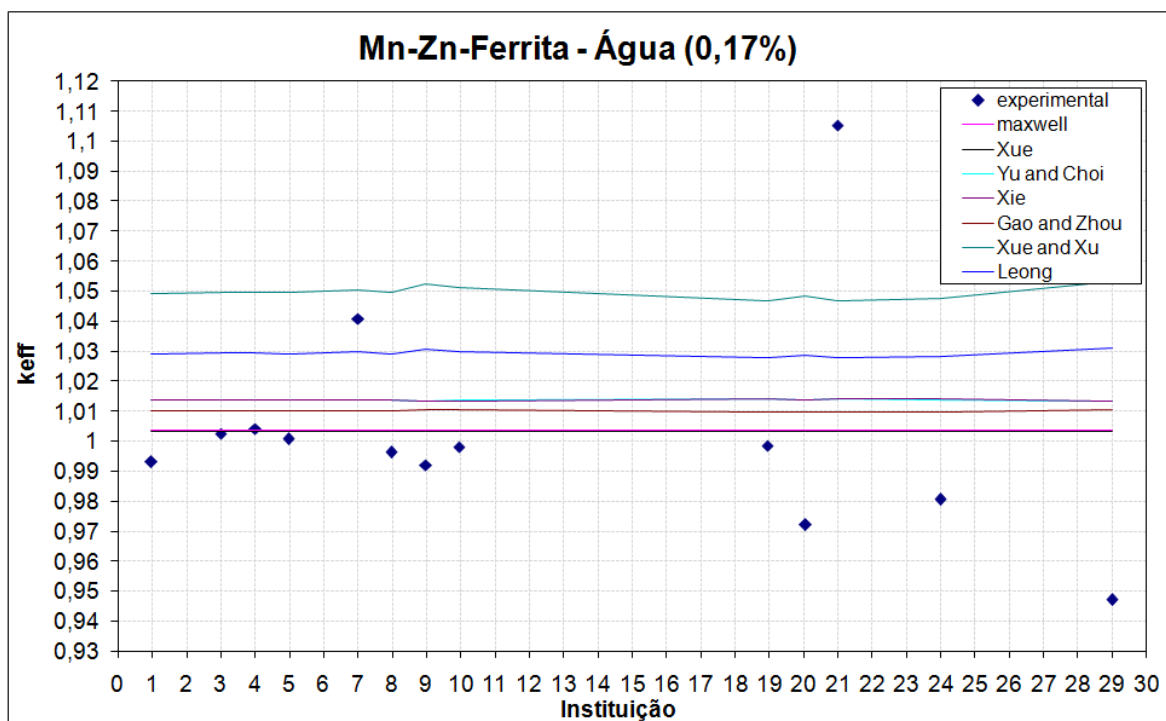


Figura 3.34 – Comparação entre os dados experimentais apresentados por Buongiorno et al. (2009) para Mn-Zn-Ferrita-água (0,17%) e correlações

3.3 Viscosidade

Este tópico mostra comparações entre alguns modelos teóricos e resultados experimentais para a viscosidade de nanofluidos. Assim como para a condutividade térmica, os modelos analisados não apresentam boa concordância com resultados experimentais da literatura e com os aumentos anômalos observados na maioria dos estudos experimentais, os modelos subestimam os experimentos. Vale ressaltar que a faixa de validade dos modelos é limitada (a 2% para o modelo de Einstein, por exemplo), e novos estudos são necessários para uma boa previsão da viscosidade de nanofluidos, especialmente para concentrações elevadas.

Na Fig. 3.35, comparações entre algumas correlações e resultados experimentais para a viscosidade do nanofluido de alumina em água. As correlações não aproximam bem os dados experimentais, e a discrepância é maior para elevadas concentrações. Para nanopartículas de 47 nm, foi obtido o maior incremento na viscosidade, e o menor foi observado para nanopartículas de 36 nm. Por estes resultados, não é possível inferir uma tendência para a influência do tamanho das nanopartículas na viscosidade de nanofluidos.

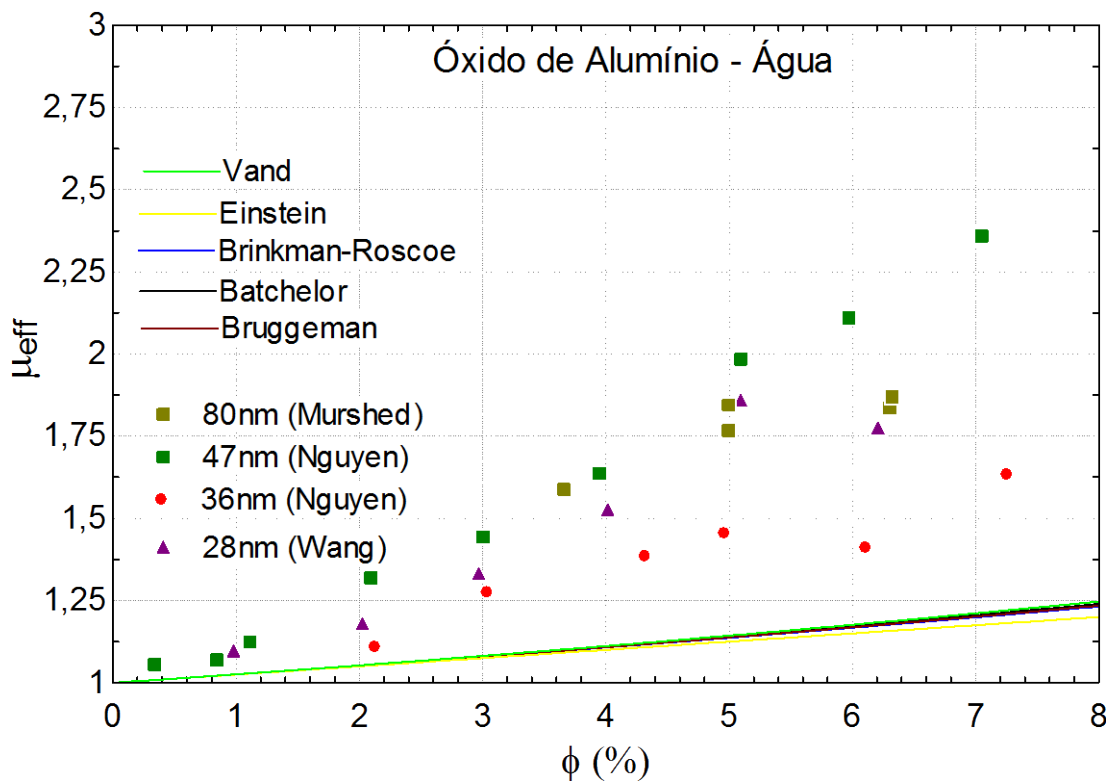


Figura 3.35 – Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido alumina – água.

Nos resultados de Chevalier (2007) para o nanofluido de óxido de silício em etanol, mostrados na Fig. 3.36, os maiores valores de viscosidade foram obtidos para os nanofluidos com menores nanopartículas, fato que está associado a presença ou ausência de aglomerações, e ao movimento de cisalhamento nestas aglomerações. Os resultados também são superiores as correlações analisadas, com elevada discrepância.

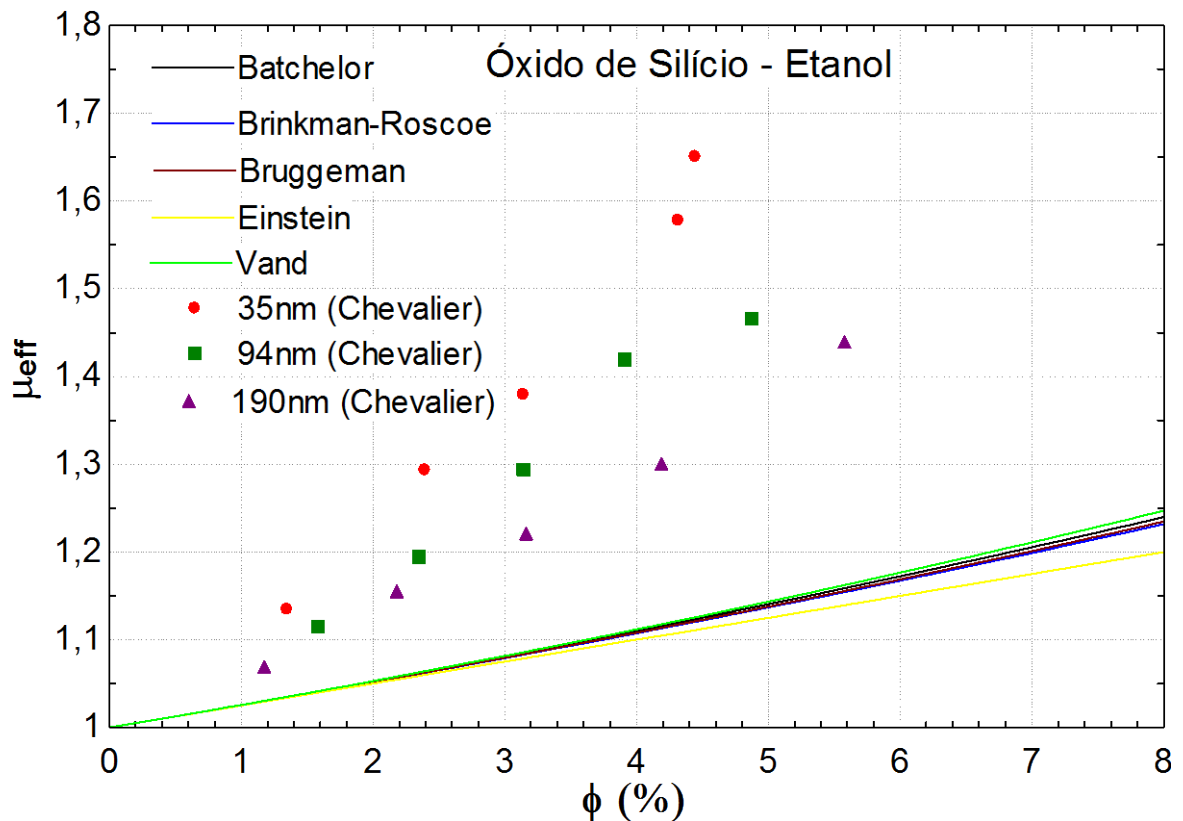


Figura 3.36 – Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido óxido de silício – etanol.

Para o nanofluido de óxido de titânio em água, a Fig. 3.37 mostra os efeitos da temperatura analisados por Duangthongsuk (2009) na viscosidade dos nanofluidos. Foi observado que a mais altas temperaturas, o incremento da viscosidade é ainda maior para os nanofluidos, e este efeito se acentua com o aumento da concentração. Vale destacar que para um dado nanofluido, a viscosidade diminuiu com a temperatura, o que incrementou com a temperatura foi a viscosidade relativa, visto que a viscosidade do fluido base também variou significativamente. Os resultados de Duangthongsuk (2009) e Murshed et al. (2008) não são aproximados com precisão pelas correlações propostas.

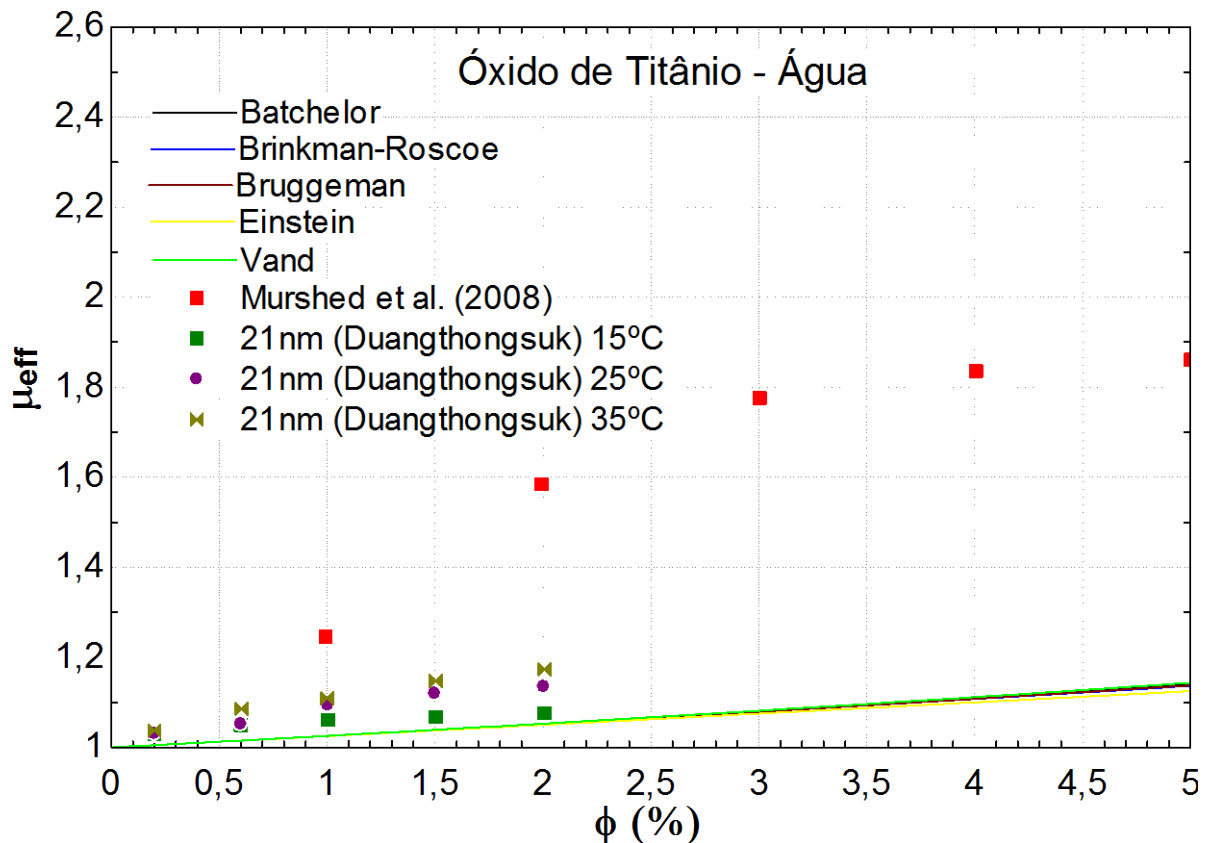


Figura 3.37 – Comparação entre resultados experimentais e correlações para a viscosidade do nanofluido alumina - água

Para a viscosidade, com relação a influência dos parâmetros, os resultados também são contraditórios. Por exemplo, nos experimentos de Chevalier et al. (2007) as maiores viscosidades são encontradas para as menores nanopartículas, enquanto para os experimentos de Nguyen et al. (2008) as maiores nanopartículas causaram maior incremento na viscosidade. Nos experimentos de Kole e Dey (2008), quanto maior a temperatura do nanofluido, menor a viscosidade relativa. Já nos resultados experimentais de Duangthongsuk (2009) a viscosidade realtiva aumentou com a temperatura, também demonstrando contraditoriedade.

Nenhuma correlação analisada apresenta aproximação razoável aos dados experimentais. Estudos adicionais são necessários para encontrar correlações ideais para prever esta propriedade dos nanofluidos, considerando efeitos de variação de temperatura e natureza das nanopartículas.

CAPÍTULO IV

PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFLUIDOS

4.1 Materiais

4.1.1 Nanopartículas

Para a produção de nanofluidos, foram adquiridas da empresa Nanostructured & Amorphous Materials, Inc. nanopartículas de prata de diâmetros médios 10 e 80 nm. As características das nanopartículas são ilustradas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Dados das nanopartículas de prata utilizadas.

Dados das nanopartículas de prata		
Tamanho	10nm	80nm
Forma	pó	pó
Densidade (kg/m ³)	10491	10491
Ponto de Fusão (°C)	960.8	960.8
Ponto de Ebulição (°C)	2210	2210
Solubilidade em água	Insolúvel	Insolúvel
Flamabilidade	Altamente inflamável	
Reações perigosas	Acetileno ou Amônia	
Pureza	99%	99,9%
Formato	esférica	esférica
Área específica (m ² /g)	9-11	

A Fig. 4.1. ilustra a caracterização microscópica fornecida pela empresa das nanopartículas, mostrando a distribuição e também as diferenças daqueles com diâmetro de 10 nm e 80 nm, respectivamente

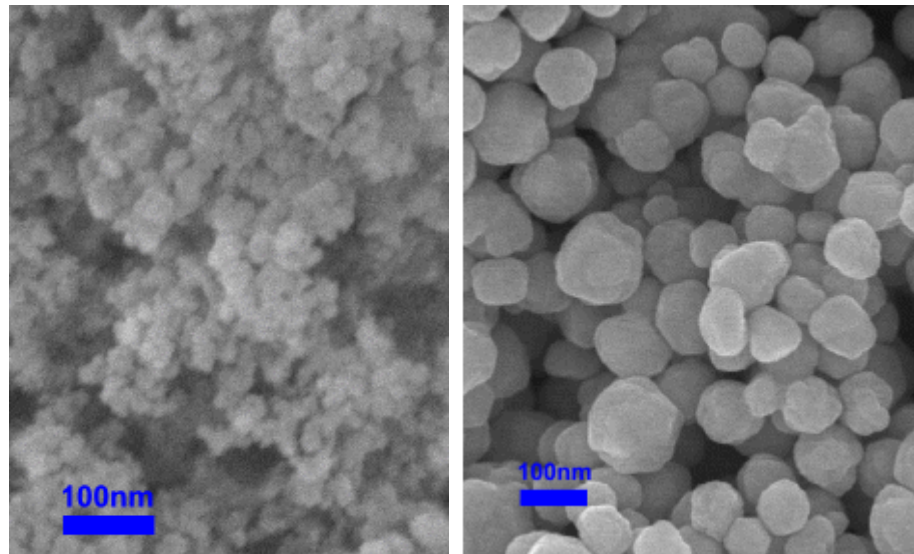


Figura 4.1 – Nanopartículas de prata da Nanostructured & Amorphous Materials, Inc., de 10 e 80 nm, respectivamente.

Também foram adquiridas nanopartículas de alumina junto ao grupo de nanofluidos da EESC- USP, também da Nanostructured & Amorphous Materials. Os dados da alumina encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados das nanopartículas de alumina utilizadas (Fonte: Motta, 2012).

Dados das nanopartículas de alumina	
Tamanho médio	20-30nm
Forma	pó
densidade (kg/m ³)	3700
Área superficial específica (m ² /g)	180
Formato	esférica

4.1.2 Homogeneizador a alta pressão

O homogeneizador a alta pressão do LEST-UFU foi adquirido junto à Artepeças Ltda. É composto por 2 pistões de 8 mm de diâmetro e 19 mm de curso, válvulas de esfera, uma válvula homogeneizadora manual, além de um bloco de homogeneização e um bloco de manômetro em aço inoxidável. Tem capacidade de aproximadamente 600 ml, por isto foi estipulado que a produção máxima por processo fosse de 500 ml.

O equipamento é dotado, ainda, de 3 seções para alimentação de água, uma com o objetivo de resfriar os pistões e as outras duas para resfriamento do fluido a ser

homogeneizado. Uma fotografia mostrando o referido homogeneizador é representada pela Fig. 4.2.



Figura 4.2 – Homogeneizador a alta pressão.

4.2 Determinação da massa de nanopartículas e fluido base

As massas de fluido e nanopartículas foram determinadas a partir da concentração volumétrica desejada:

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{bf}}$$

Em que V_{np} e V_{bf} representam os volumes de nanopartículas e fluido base, respectivamente.

$$\text{Como } \rho = \frac{m}{V}, \quad \phi = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np}}{\rho_{np}} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} \Rightarrow \phi = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np} \rho_{bf} + m_{bf} \rho_{np}}{\rho_{bf} \rho_{np}}}$$

Em que m_{np} , m_{bf} , ρ_{np} , ρ_{bf} representam a massa de nanopartículas, massa de fluido base e as massas específicas de nanopartículas e fluido base, respectivamente.

$$\text{Portanto: } \phi = \frac{m_{np} \rho_{bf}}{m_{np} \rho_{bf} + m_{bf} \rho_{np}}$$

Assim pode-se determinar a massa de nanopartículas em função da concentração volumétrica, da massa de fluido base e das massas específicas de fluido base e nanopartículas:

$$m_{np} = \frac{\phi m_{bf} \rho_{np}}{\rho_{bf} - \phi \rho_{bf}} \quad (4.1)$$

4.3 Procedimento experimental

4.3.1 Preparação dos nanofluidos

Nanopartículas e fluido base foram colocados em béqueres da empresa Diogolab e as massas foram medidas com uma balança de precisão (0,001g) adquirida junto a Alfa Mare Ltda.

Para acionar o homogeneizador, certificou-se que a válvula de alimentação da água que refrigera o pistão estava ligada. A circulação de água que resfria o nanofluido deve estar pronta para ser acionada a qualquer momento. O homogeneizador deve ser ligado apenas com água circulando para verificar se há vazamentos e, também, se a máquina está operando em perfeito estado.

Logo após, adicionou-se cerca de 400ml de água e o homogeneizador foi ligado. 100 ml foram deixados no béquer para solucionar eventuais problemas de entupimento do homogeneizador. A pressão do homogeneizador foi elevada até a pressão de operação, em cerca de 400 bar. Posteriormente, as nanopartículas foram adicionadas lentamente, com o objetivo de se evitar entupimentos. Um misturador foi utilizado para auxiliar no processo de homogeneização. A cada adição de nanopartículas, a pressão do homogeneizador apresentou uma queda. Isto ocorre quando nanopartículas em excesso chegam ao pistão, obstruindo o fluxo de fluido, provocando esta queda de pressão. Quando a pressão retorna ao valor de operação, torna-se a adicionar nanopartículas. Após o início do processo de homogeneização, o fluido experimenta um aumento de sua temperatura. O banho térmico

deve de ser acionado com o objetivo de manter a temperatura do nanofluido em valores reduzidos, baixa taxa de evaporação e, conseqüentemente, perda de material.

Ao final do processo, toda a massa de nanopartículas foi adicionada ao homogeneizador e o restante de água no béquer foi, também, adicionado   amostra. A pressão foi controlada e mantida acima de 400 bar, até o fluido se homogeneizar totalmente, fato que deve ser verificado visualmente pelo operador. Esta parte do processo demandou aproximadamente 30 minutos.

O fluido pronto foi retirado e sua massa medida. Devido   água presente no homogeneizador quando do início do processo, por vezes foram retiradas massas superiores às nominais.

Imediatamente, 3 amostras do nanofluido foram retiradas em diferentes volumes, em béqueres pequenos, para a determina o da concentra o real dos nanofluidos. Foram medidas as massas das amostras e, posteriormente, os béqueres foram colocados sobre chapas quentes com o objetivo de evaporar a  gua. Como o ponto de ebuli o da água   muito inferior ao da prata, apenas a água evaporou e a massa restante no béquer após o processo era a massa de nanopartículas da amostra. Sabendo as massas de nanopartículas e fluido base, a concentra o foi determinada utilizando novamente a equa o 4.1.

4.3.2 Medida da condutividade térmica

A condutividade térmica dos fluidos foi medida pelo método do fio quente transiente (THW), também conhecido como sonda linear, cujo princípio foi explicado anteriormente. Foi utilizada uma sonda Hukseflux TP-08, disponível no laboratório de refrigera o da EESC-USP. O equipamento   mostrado na Fig. 4.3. Esta sonda   indicada para a avalia o de materiais com condutividade térmica entre 0,1 e 6 W/m-K.

A aquisi o de dados e controle foram efetuados utilizando placas de aquisi o da National Instruments e programa o em Labview. O sistema consiste de um chassi NI PXI-1000B, um controlador embutido NI PXI-8170 e uma placa de aquisi o de 24 bits NI PXI-4351 para aquisi o de temperatura.



Figura 4.3 – Sonda Hukseflux TP-08 (Fonte: Motta, 2012).

Com base na norma ASTM D5334-08 e na forma como é determinada a temperatura nesta sonda, a equação 2.14 pode ser simplificada e a condutividade térmica, k , dada por:

$$k = \frac{q}{4\pi\Delta T} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (4.2)$$

Onde q é o fluxo de calor por unidade de comprimento, T e t representam a temperatura e o tempo, respectivamente.

A sonda, que já estava calibrada para a água ($k=0,600$ W/m-K), foi totalmente imersa no fluido e após ligar o circuito elétrico, a temperatura foi medida durante um tempo superior a 50 s. A condutividade térmica foi determinada a partir da região linear do gráfico $\Delta T \times \ln(t)$ utilizando a equação 4.2, visto que q é aproximadamente constante durante o experimento. Os experimentos foram realizados com o fluido à temperatura ambiente.

4.3.3 Medição da viscosidade

As medições de viscosidade foram realizadas em um reômetro Brookfield LVDV-IIIU, tipo cone-placa, disponível na EESC-USP, conforme Fig. 4.4. Este equipamento mede a tensão de cisalhamento para pequenas amostras de fluidos a partir de uma taxa de deformação imposta, além, de determinar o torque necessário para girar o elemento cônico (spindle). A geometria utilizada nos testes foi a spindle CPE-40, que requer uma amostra de aproximadamente 0,5 ml (Motta, 2012). Para garantir a temperatura de testes, o copo foi acoplado a um banho termostático. A viscosidade dos nanofluidos foi medida para uma temperatura de 25°C.



Figura 4.4 – Reômetro utilizados nos experimentos (Fonte: Motta, 2012).

Os dados de temperatura, tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade dinâmica foram registrados a cada 25 segundos. O reômetro foi calibrado com água destilada, que apresentou viscosidade de 0,89 cP.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Os resultados experimentais apresentados nesta seção se referem, primeiramente, a uma campanha de preparação, síntese e caracterização de nanofluidos de prata. A segunda etapa mostra os resultados obtidos da análise das propriedades térmicas (condutividade térmica e viscosidade dinâmica) realizada no laboratório de refrigeração da EESC-USP e também na UFRJ.

5.2 Estabilidade

Conforme mencionado anteriormente, a campanha de ensaios para a obtenção de dispersões homogêneas de nanopartículas de foi realizada, objetivando a confecção de distintas concentrações entre 0,1 e 0,3 % em volume. Para todas as amostras confeccionadas foi constatada apenas uma ligeira decantação após o período de dois meses. A Fig. 5.1 ilustra uma fotografia das amostras de nanofluidos de prata para as distintas concentrações e tamanho de nanopartículas.



Figura 5.1 – Amostras de nanofluidos prata-água, diâmetro de 10 e 80 nm, respectivamente.

Uma análise importante foi realizada após a preparação das amostras que se refere a verificação da concentração real do nanofluido, uma vez que durante o processo de homogeneização há perda de nanopartículas e também de fluido base

Nestas condições, constatou-se que a concentração final obtida foi inferior a nominal colocada no equipamento. Isto, também, pode ser devido ao fato de existir água no homogeneizador no início do processo de mistura. As tabelas 5.1 e 5.2 mostram as concentrações reais obtidas para os nanofluidos com nanopartículas de prata de 10 e 80 nm.

Tabela 5.1– Amostras de nanofluidos produzidos com prata 10nm

Amostra nº		3	10	11
diâmetro (nm)		10	10	10
massa de água (g)		536,794	536,685	534,826
massa de nanopartículas (g)		5,249	10,515	15,787
concentração nominal (%)		0,093	0,188	0,282
Concentração real (%)	medição 1	0,074	0,125	0,222
	medição 2	0,080	0,131	0,219
	medição 3	---	0,139	---

Tabela 5.2 – Amostras de nanofluidos produzidos com prata 80nm

Amostra nº	1	2	4	5	6	7	8	9	
diâmetro (nm)	80	80	80	80	80	80	80	80	
massa de água (g)	531,945	491,911	529,751	531,368	546,202	540,679	543,482	537,977	
massa de nanopartículas (g)	5,250	10,518	5,250	5,220	10,510	10,513	15,789	15,785	
concentração nominal (%)	0,094	0,203	0,094	0,094	0,183	0,186	0,278	0,281	
Concentração real (%)	medição 1	0,079	0,170	0,078	0,078	0,149	0,156	0,224	0,197
	medição 2	0,079	0,173	0,076	0,082	0,151	0,161	0,228	0,226
	medição 3	---	---	---	---	0,147	0,162	0,233	0,227

As amostras de nanofluidos de prata de 10 nm foram evaporadas e submetidas a um microscópio eletrônico de varredura (MEV), disponível no Laboratório de Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia. Pode-se observar na Fig. 5.2a, com ampliação de 140000 vezes, que houveram ocorrência de aglomerações, em virtude principalmente da evaporação do fluido base, uma vez que o processo de visualização por microscopia eletrônica de varredura exige que a amostra seja seca, pois o processo se dá numa câmara de vácuo. Nota-se, também, que o padrão da micrografia é semelhante ao visualizado por Kosmala et al. (2011), Fig. 5.2b (ampliação de 80000 vezes), indicando um padrão de imagem para esta natureza de nanopartículas. Existem algumas aglomerações típicas, onde não se identificam as nanopartículas, e outras onde se nota o tamanho das nanopartículas aglomeradas, em virtude da evaporação do fluido base. A Fig. 5.3 apresenta a micrografia de nanopartículas a 0,1% em uma ampliação menor, de 30000 vezes. Observou-se uma imagem mais homogênea, que mostra nanopartículas dispersas de forma mais uniforme.

Na Fig. 5.4, que ilustra as micrografias obtidas para as nanopartículas com concentração de 0,3%, observou-se também a formação de aglomerações, em maior número. Nesta figura, é possível, ainda, perceber também que as nanopartículas isoladas têm tamanho próximo ao informado pelo fabricante (10 nm).

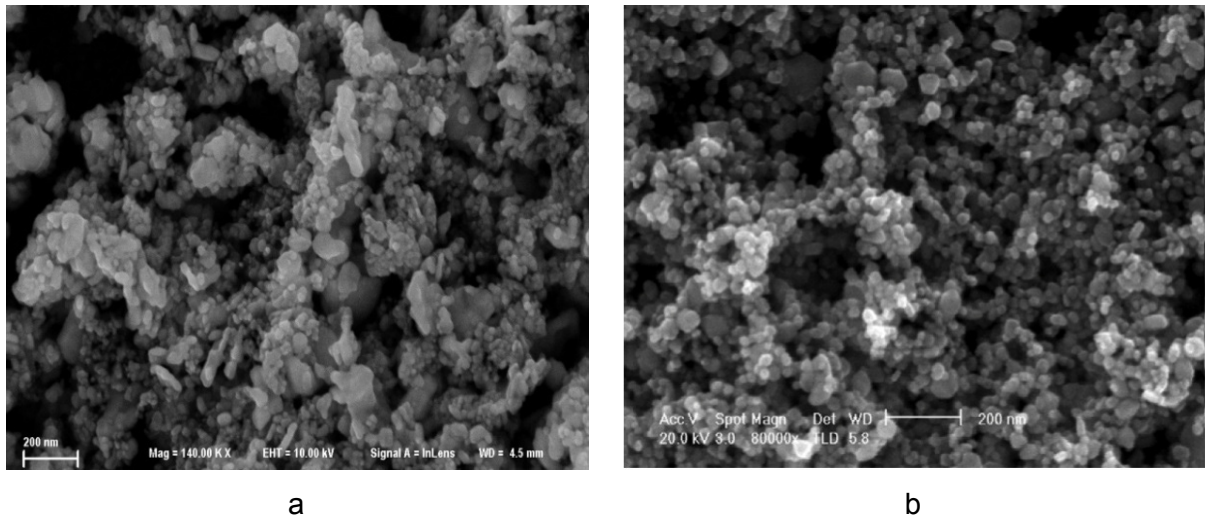


Figura 5.2 – Micrografia de nanopartículas de prata: A: presente trabalho, ampliado 140000 vezes (0,1%); B: Kosmala et al. (2011), ampliado 80000 vezes.

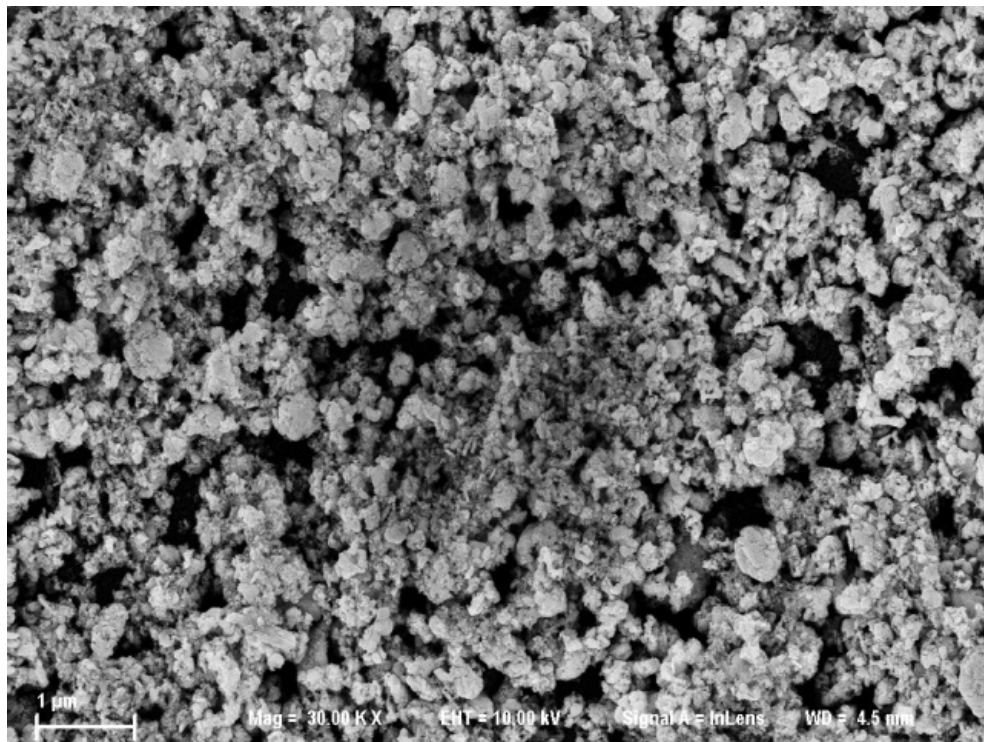


Figura 5.3 – Micrografia de nanopartículas de prata (0,3%).

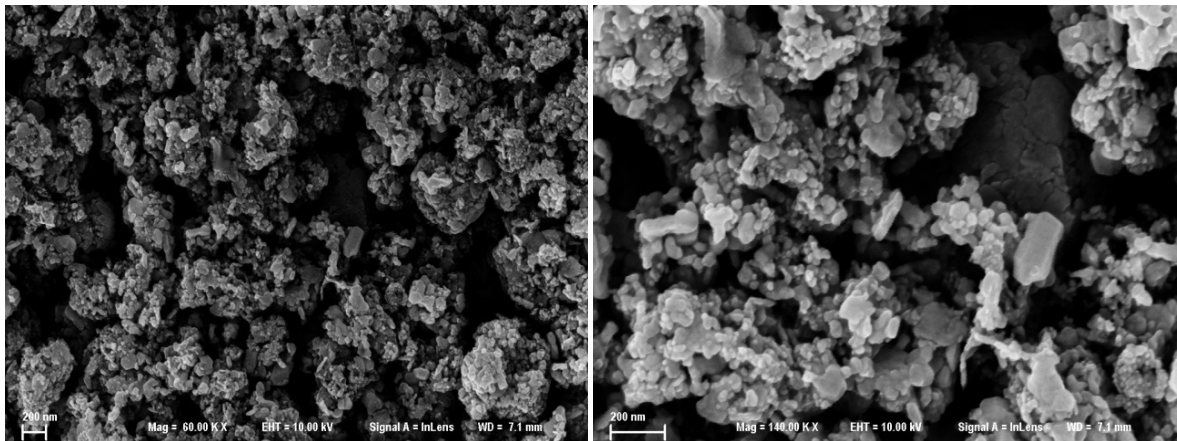


Figura 5.4 – Micrografias de nanopartículas de prata (0,3%).

Nanopartículas de alumina foram fornecidas pelo laboratório de refrigeração da EESC-USP, para preparação de nanofluidos utilizando o processo de homogeneização por alta pressão. Numa primeira análise, as suspensões não se mostraram estáveis, havendo rápida decantação, praticamente instantânea, como pode ser observado na Fig. 5.5. Foram produzidos nanofluidos nas concentrações de 0,1; 0,5 e 1%, respectivamente, em volume.

A alumina apresentou menor estabilidade do que a prata após dispersa pela homogeneização. Isto, possivelmente, ocorreu porque apesar da maior afinidade da alumina com água do que a prata com água, as partículas de alumina apresentam maior tendência em formar aglomerações e este fator foi preponderante. Devido à esta afinidade, as nanopartículas de alumina tem mais facilidade de se mover dentro do fluido base e formar aglomerações. No entanto, novas análises necessitam ser realizadas, principalmente no que tange a temperatura de homogeneização.



Figura 5.5 – Amostras de nanofluidos alumina – água.

5.3 Condutividade Térmica

Foram realizadas medições de condutividade térmica para os nanofluidos de prata avaliados a temperatura de 25°C. Conforme mencionado anteriormente, para tais ensaios foi utilizado o equipamento disponibilizado no laboratório de refrigeração da EESC-USP. Três testes foram executados para cada uma das 6 amostras analisadas. As tabelas 5.3 e 5.4 mostram os valores obtidos. É interessante notar que os valores obtidos são superiores aos obtidos para água (0,6 W/m K), mesmo para as baixas faixas de concentrações analisadas. A incerteza de medição foi calculada com base nas recomendações do fabricante ($\pm 3\% + 0,02$ W/m K) e utilizando um critério proposto por Incerpi (2008).

Tabela 5.3 – Condutividade térmica para os nanofluidos de água e prata 10 nm.

Φ (%)	k (W/m K)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	média	incerteza
0,1	0,631	0,654	0,653	0,646	0,023
0,2	0,664	0,650	0,644	0,653	0,023
0,3	0,720	0,715	0,701	0,712	0,023

Tabela 5.4 – Condutividade térmica para os nanofluidos de água e prata 80 nm.

Φ (%)	k (W/m K)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	média	incerteza
0,1	0,638	0,663	0,649	0,650	0,023
0,2	0,654	0,661	0,646	0,654	0,023
0,3	0,710	0,714	0,696	0,707	0,023

A tabela 5.5 ilustra resultados obtidos pelo grupo de nanofluidos da UFRJ, para uma amostra de nanofluidos de prata de 80 nm dispersos em água, a uma concentração volumétrica de 0,15 %, produzida no LEST-UFU. Conforme pode ser observado, foram realizadas diversas medições para o nanofluido de prata de 80 nm com concentração de 0,15%, e também para água pura. É interessante observar que a média obtida das medições para este nanofluido apresentou valor de 0,66 W/m K, valor este 10% superior a condutividade do fluido base, puro. Este valor se apresentou muito próximo aos valores medidos na EESC-USP, que foi de 0,654 W/m K para uma concentração de 0,2%.

Tabela 5.5 – Condutividade térmica para o nanofluido de água e prata 80 nm (0,15%) medidos pela UFRJ.

Nanofluido Ag/Água 0,15%	Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/m K)	Incerteza (3%+0,02)
	27,4	0,6	0,038
	27,6	0,72	0,042
	27,5	0,74	0,042
	28,1	0,78	0,043
	27,3	0,6	0,038
	28,4	0,63	0,039
	27,6	0,63	0,039
	28,3	0,75	0,042
	28,4	0,63	0,039
	27,7	0,67	0,04
	28,3	0,63	0,039
	28,1	0,61	0,038
	27,6	0,65	0,04
	27,9	0,64	0,039
	28,2	0,7	0,041
	28,4	0,61	0,038
	28,1	0,73	0,042
	27,5	0,61	0,038
	28,3	0,65	0,039
	28,4	0,65	0,04
	28,1	0,62	0,039
média	28	0,66	0,04

A Fig. 5.6 mostra a condutividade térmica relativa para os nanofluidos com nanopartículas de prata dispersas em água. Pode-se observar que a condutividade térmica aumentou com o incremento da concentração de nanopartículas e, para a concentração de 0,3%, a intensificação da condutividade térmica foi de aproximadamente 18%. Não é possível inferir a influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica dos nanofluidos, já que para concentrações de 0,1 e 0,2 % a condutividade para nanopartículas de 80 nm foi superior, enquanto para 0,3% as nanopartículas de 10 nm proporcionaram maior condutividade térmica. Isso evidencia que novas medições e em faixas mais amplas de concentração devem ser realizadas na tentativa de se obter tendências mais consistentes.

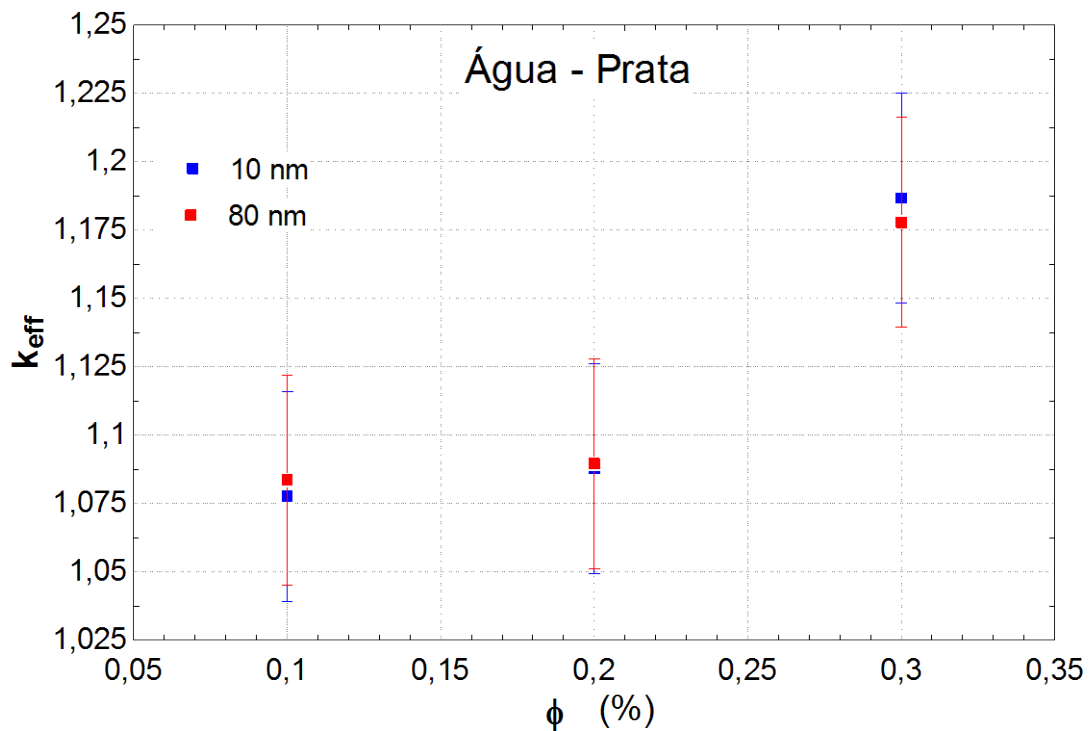


Figura 5.6 – Condutividade térmica relativa para os nanofluidos analisados.

5.4 Viscosidade

Os ensaios para obter os valores da viscosidade dos nanofluidos produzidos foram também realizados no laboratório de refrigeração da EESC-USP. Cada amostra também teve a viscosidade medida três vezes, à temperatura de 25°C. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas 5.6 e 5.7. Pode-se observar que a viscosidade dos nanofluidos é praticamente igual a da água (0,89 cP). O incremento para essa faixa de concentrações foi irrisório. Além disso, como a incerteza associada a cada medida é de 0,4 cP (1% do fundo de escala do equipamento, que é de 3 cP, mais 1% do valor medido). Nessas condições, pode-se afirmar que os resultados estão dentro da faixa de incerteza, tornando difícil uma análise mais profunda desta propriedade.

Tabela 5.6 – Viscosidade dinâmica para os nanofluidos de água e prata 10 nm

Φ (%)	μ (cP)				
	medição1	medição2	medição3	média	incerteza
0,1	0,89	0,87	0,88	0,88	0,04
0,2	0,94	0,92	0,92	0,93	0,04
0,3	0,89	0,93	0,88	0,90	0,04

Tabela 5.7 – Viscosidade dinâmica para os nanofluidos de água e prata 80 nm

Φ (%)	μ (cP)				
	medição1	medição2	medição3	média	incerteza
0,1	0,90	0,89	0,91	0,90	0,04
0,2	0,92	0,89	0,91	0,91	0,04
0,3	0,88	0,87	0,87	0,87	0,04

As Figs. 5.7 e 5.8 ilustram a tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para os nanofluidos com nanopartículas de 10 e 80 nm, respectivamente. É possível perceber um comportamento linear da curva, demonstrando que o comportamento dos fluidos é newtoniano. Isto se deve ao fato de terem sido analisadas amostras com baixas concentrações, que pouco alteraram o comportamento do fluido base. Nota-se também que a taxa de cisalhamento pouco se alterou com a concentração, indicando pouca influência da adição de nanopartículas na viscosidade dos fluidos. Para as nanopartículas de 10 nm, as maiores tensões de cisalhamento são observadas na concentração de 0,2%, enquanto para as de 80 nm a maior taxa é para a concentração de 0,1%, também indicando que a variação nas medições não se deve à mudança de concentração e sim à incerteza experimental associado.

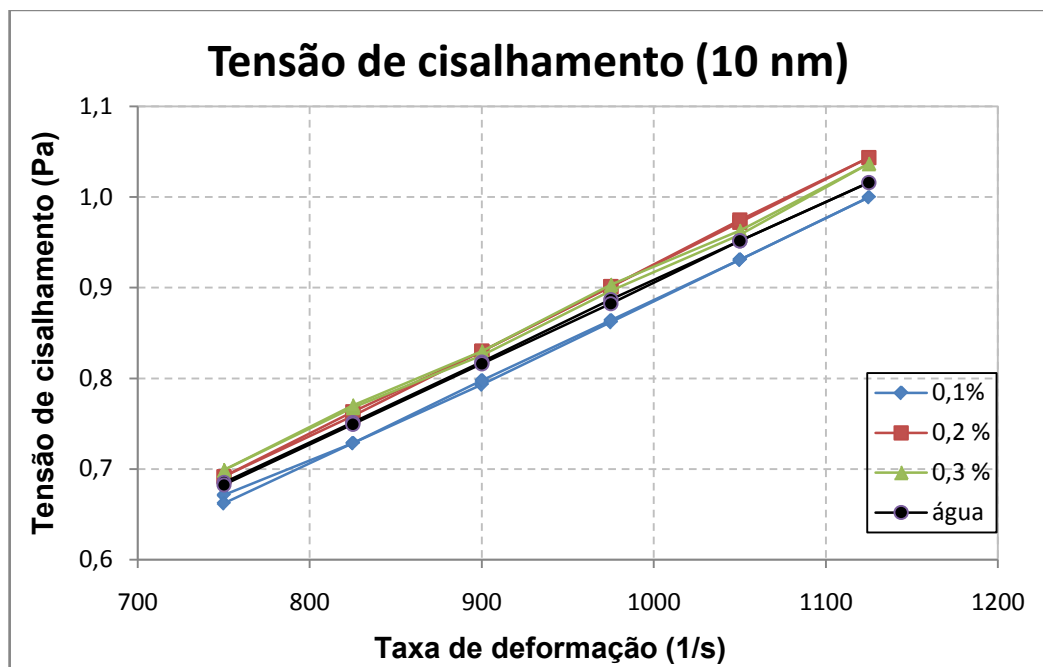


Figura 5.7 – Tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento para os nanofluidos com prata 10nm.

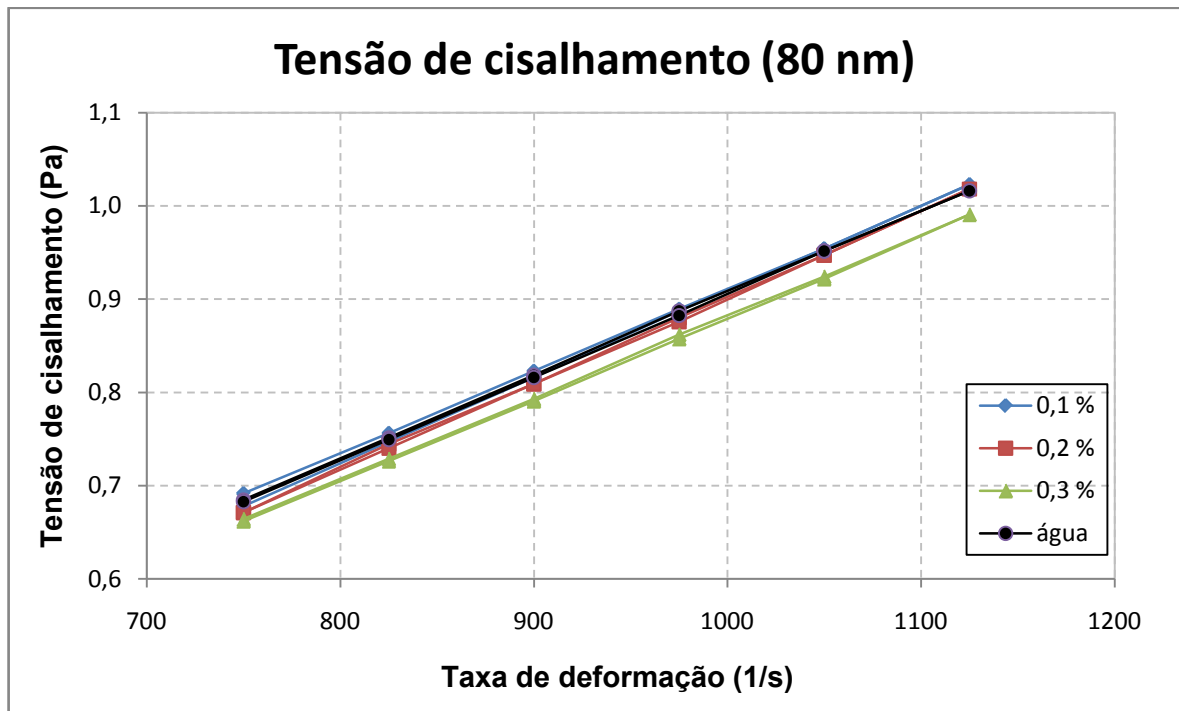


Figura 5.8 – Tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento para os nanofluidos com prata 80nm.

A Fig. 5.9 mostra a viscosidade relativa para os nanofluidos analisados. O maior incremento, 5%, foi observado para a concentração de 0,2% de nanopartículas de 10 nm. Este incremento foi superior ao da concentração de 0,3%. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, todos os incrementos observados são inferiores à incerteza experimental nessas condições, portanto não se pode concluir com propriedade que a viscosidade dos nanofluidos apresentou incrementos comparados ao fluido base, como seria de esperar. Pelo mesmo motivo não é possível estabelecer uma influência do tamanho das nanopartículas na viscosidade dos nanofluidos. Deve-se ressaltar que a faixa de concentrações analisada é baixa e é esperado que em elevadas concentrações, o incremento da viscosidade se torne mais pronunciado.

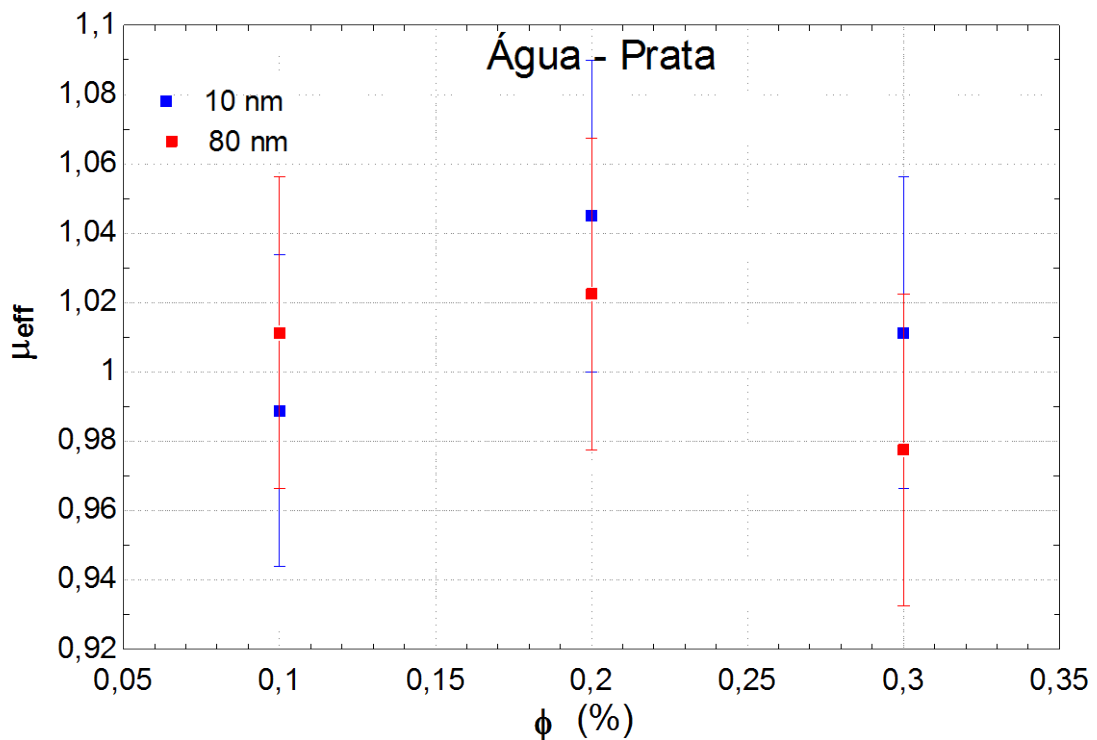


Figura 5.9 – Viscosidade dinâmica relativa para os nanofluidos analisados.

5.5 Comparações com dados da literatura

Nesta seção são comparados os resultados obtidos no presente estudo com as principais correlações e resultados experimentais disponíveis na literatura.

5.5.1 Condutividade térmica

Ao comparar os resultados obtidos com as correlações da literatura, observou-se discrepâncias significativas. Nas Figs. 5.10 e 5.11 pode-se observar que os valores de condutividade térmica previstos nas correlações são significativamente inferiores aos resultados experimentais obtidos no presente trabalho, mesmo para as baixas concentrações analisadas. Para as nanopartículas de prata de 10 nm, a correlação que apresentou os maiores valores de condutividade térmica foi a de Xie et al. (2005), cerca de 8% de aumento para uma concentração de 0,3%. Entretanto, o incremento observado na condutividade térmica para esta concentração foi superior a 18%. Já para nanopartículas de 80 nm, a correlação de Leong et al. (2005) foi a que apresentou os maiores valores do aumento da condutividade térmica. Tal incremento foi de aproximadamente 3% na

concentração para 0,3%, enquanto os resultados experimentais indicaram um aumento de aproximadamente 18%.

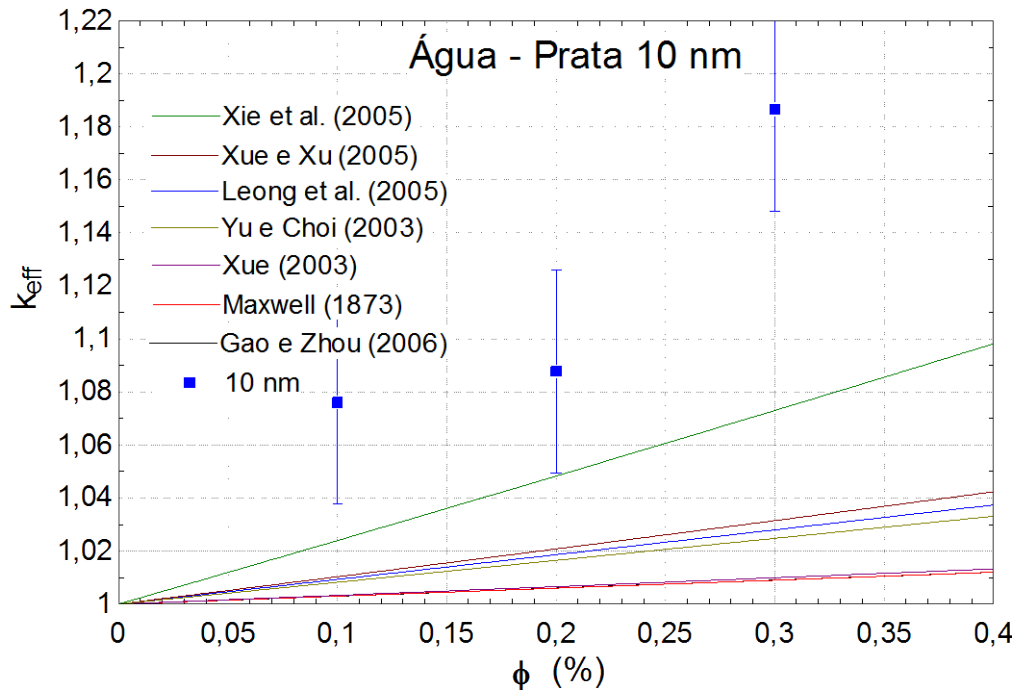


Figura 5.10 – Comparação entre a condutividade térmica obtida para os fluidos com nanopartículas de prata 10 nm e modelos da literatura.

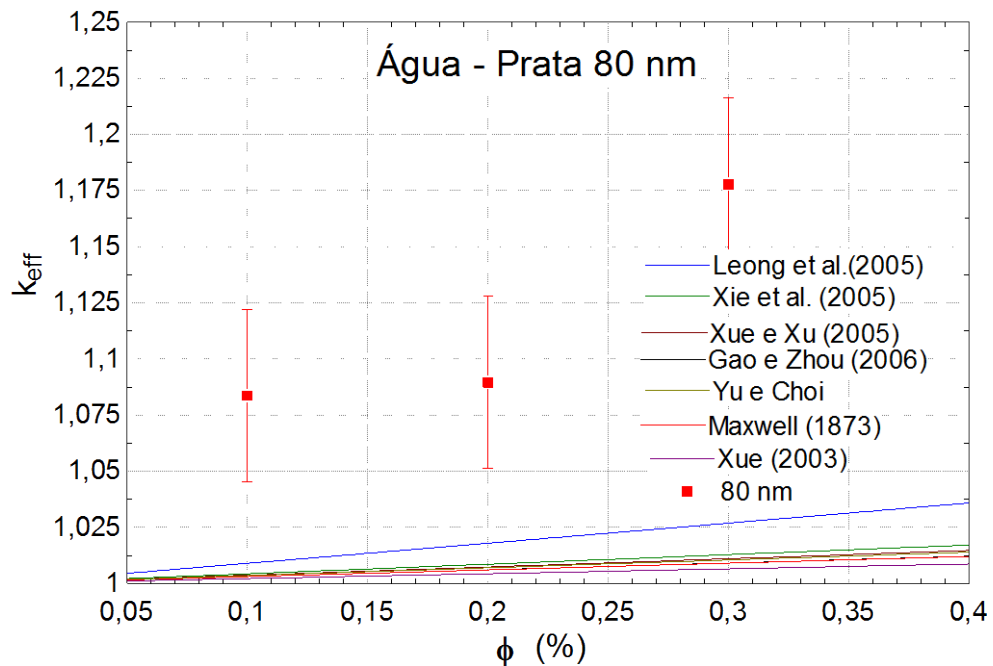


Figura 5.11 – Comparação entre a condutividade térmica obtida para os fluidos com nanopartículas de prata 80 nm e modelos da literatura.

Existem poucos resultados experimentais disponíveis na literatura para a condutividade térmica de nanofluidos de prata em água, para uma comparação consistente, principalmente pela dificuldade de estabilização e preço deste tipo de nanofluido. A Fig. 5.12 mostra uma comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os resultados de Paul et al. (2012), que mediu a condutividade térmica de um nanofluido com nanopartículas de prata de 55 nm em água, para baixas concentrações. Os nanofluidos foram produzidos por um processo denominado “wet chemical bottom up”, que é um método de um passo onde nitrato de prata foi evaporado em meio a um agente redutor que foi adicionado mediante forte agitação. A condutividade térmica foi medida pelo método do fio quente. Observa-se que o incremento na condutividade térmica para o autor analisado é muito superior ao do presente trabalho, mesmo com menores concentrações analisadas, inclusive para concentrações próximas a 0% obteve incremento de 8% na condutividade térmica, mostrando certa inconsistência.

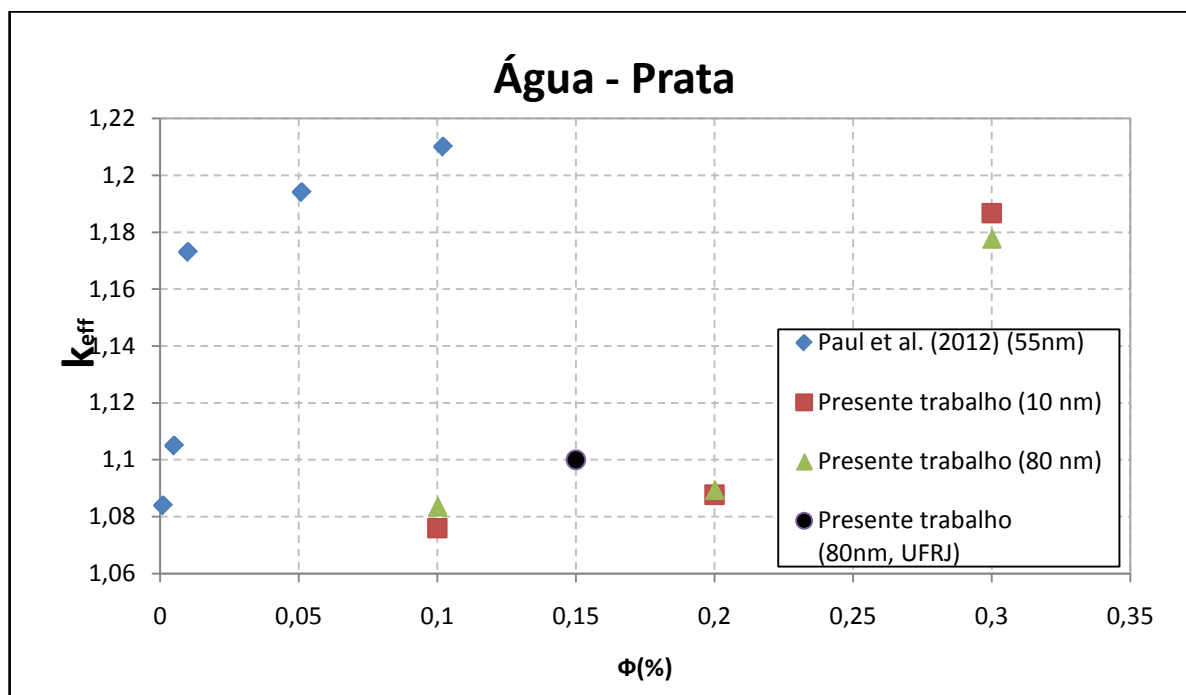


Figura 5.12 – Comparação dos resultados de condutividade térmica obtidos no presente trabalho com os de Paul et al. (2012).

5.5.2 Viscosidade

As correlações conhecidas para a previsão da viscosidade de suspensões sólido-líquido apresentam pequenos erros com relação aos resultados obtidos, da ordem de 3%. Porém deve-se destacar que para esta faixa de concentrações o incremento previsto nas

correlações é muito pequeno, enquanto nos resultados não foram observados incrementos significativos, explicando a pequena discrepância entre experimento e correlações. É necessário avaliar nanofluidos com concentrações mais elevadas para melhor analisar modelos que se ajustam bem a resultados experimentais. A comparação está apresentada na Fig. 5.13.

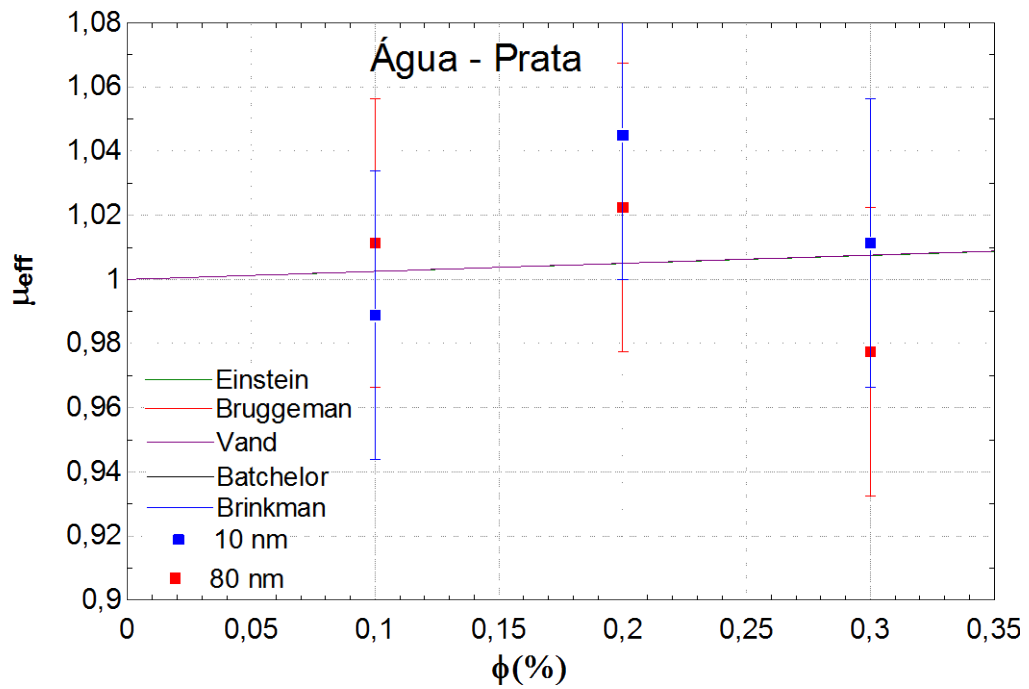


Figura 5.13 – Comparação entre correlações e os resultados obtidos para a viscosidade dos nanofluidos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Os modelos para previsão da condutividade térmica de nanofluidos não representam bem os resultados experimentais encontrados por diversos autores. Alguns parâmetros não são suficientemente analisados para serem levados em consideração, como a nanocamada, enquanto fatores importantes não são considerados no cálculo da condutividade térmica relativa, como a temperatura.

As teorias de previsão da viscosidade de suspensões com partículas sólidas se mostram ainda mais deficientes, visto que prevêm os mesmos incrementos para solutos de natureza diferentes. Estes modelos também não representam previsões razoáveis para a viscosidade de nanofluidos, subestimando praticamente todos os resultados experimentais da literatura.

Por este estudo, verifica-se que a homogeneização por alta pressão é um excelente método para a produção de nanofluidos baseados em prata e água, visto que não houve sinais de decantação ou aglomerações durante um longo período. Espera-se que o método seja eficiente para metais estáveis em geral, assim como para partículas que proporcionem maior potencial zeta nos fluidos, provocando repulsão entre as partículas e garantindo estabilidade e homogeneidade do fluido.

Por outro lado, o método não se mostrou eficiente na produção de nanofluidos baseados em alumina, já que houve deposição praticamente instantânea. Este fato ocorreu porque a alumina não tem o mesmo potencial de repulsão entre as nanopartículas que a prata. Assim, as partículas tendem a se aglomerar caso não seja utilizado algum surfactante. Entretanto, novos ensaios deverão ser realizados para verificar essa diferença.

Os resultados obtidos mostram que mesmo em pequenas concentrações, nanofluidos de prata em água possuem condutividade térmica significativamente superior a da água, incremento de 18% para uma concentração de 0,3% em volume. Notou-se, ainda, que a condutividade efetiva aumentou com a concentração de nanopartículas.

Por outro lado, na viscosidade não foi observado incremento significativo e os incrementos observados foram inferiores à incerteza experimental associada. Novas medidas deverão ser realizadas para confirmar os resultados obtidos no presente trabalho.

Caso essa tendência seja confirmada, o fato do aumento significativo na condutividade térmica e pequeno aumento na viscosidade indicam que o uso de nanofluidos, nesta faixa de concentrações, poderia ser implementado em sistemas térmicos com significativo aumento na transferência de calor e incremento muito baixo na potência de bombeamento.

6.2 Trabalhos Futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, é importante verificar as propriedades, principalmente a densidade, informadas pelos fabricantes de nanopartículas. Durante a produção de nanopartículas, estas propriedades podem variar com relação ao material no seu tamanho original e isto deve ser considerado.

Deve-se propor modelos mais razoáveis para a previsão de propriedades dos nanofluidos, inclusive propriedades que praticamente não foram estudadas, como o calor específico. Além disso, é muito importante a medida das propriedades termodinâmicas realizadas por diferentes laboratórios, com o objetivo de verificar alguma dispersão nos resultados.

Os nanofluidos produzidos devem ser testados em trocadores de calor, nas bancadas existentes no LEST-UFU, a fim de terem seu desempenho comparado com os fluidos base, e avaliar seu desempenho térmico/hidráulico.

A produção de nanofluidos deve ser estudada mais profundamente, no intuito de melhorar e padronizar o preparo das soluções. Parâmetros como tempo de homogeneização, temperatura do fluido e do banho térmico devem ser controlados e sua influência na estabilidade e propriedades dos nanofluidos, determinada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATCHELOR , G.K., The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, **Journal of Fluid Mechanics** 83: 97-117 (1977).
- BOUANIS, F.Z., BARATON, L., HU, C.V., PRIBAT, D., COJOCARU, C.S., High-quality single-walled carbon nanotubes synthesis by hot filament CVD on Ru nanoparticle catalyst, **Thin Solid Films** 519: 4594–4597 (2011).
- BRINKMAN, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions, **The journal of Chemical Physics** 20: 571-573 (1952).
- BRUIJIN, H., The viscosity of suspensions of spherical particles, **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas** 61: 863-874 (1942).
- BUONGIORNO, J., et al., The international nanofluid property benchmark exercise, **Journal of Applied Physics** 106: 1-14 (2009).
- CASQUILLAS. G.V., BERRE, M.L., PEROZ, C., CHEN, Y., GREFFET, J.J., Microlitre hot strip devices for thermal characterization of nanofluids, **Microelectronic Engineering** 84: 1194–1197 (2007).
- CHANDRASEKAR, M., SURESH, S., BOSE, A.C., Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, **Experimental Thermal and Fluid Science** 34: 210–216 (2010).
- CHANDRASEKAR, M., SURESH, S., BOSE, A.C., Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al₂O₃/water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts, **Experimental Thermal and Fluid Science** 34: 122-130 (2010).
- CHAUPIS, J.E.R., **Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos**, 164 f., Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil (2011).
- CHEN, L.C., Preparation of TiO₂ Nanoparticles by submerged arc nanoparticle synthesis system, **Journal of Alloys and Compounds** 495: 476–480 (2010).

CHEN, L., XIE, H., LI, Y., YU, W., Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction, **Thermochemica Acta** 477: 21–24 (2008).

CHEVALIER, J., TILLEMENT, O., AYELA, F., Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels, **Applied Physics Letters** 91, 233103 (2007).

CHOI, S.U.S., Developments and applications of non-newtonian flows, **ASME FED** vol. 66: 99-105 (1995).

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** 79, number 14: 2252-2254 (2001).

CHOI, S.U.S., YU, W., The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model, **Journal of Nanoparticle Research** 5: 167-171 (2003).

DAVIS, W.R., Hot-Wire Method for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Materials, **Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods**, Vol. 1 Survey of Measurement Techniques, p. 161 (1984).

DONZELLI, G., CERBINO, R., VAILATI, A., Bistable Heat Transfer in a Nanofluid, **Physical Review Letters** 102, 104503 (2009).

DUANGTHONGSUK, W., WONGWISES, S., Measurement of Temperature-Dependent Thermal Conductivity and Viscosity of TiO₂-Water Nanofluids, **Experimental Thermal and Fluid Science** 33, Issue 4: 706-714 (2009).

DUANGTHONGSUK, W., WONGWISES, S., Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance, **Experimental Thermal and Fluid Science** 34: 616–624 (2010).

EINSTEIN, A., Eine neue Bestimmung der molekuldimensionen, **ANN. DER PKYSIC** 19: 289 (1906).

GAO, L., ZHOU, X.F., Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids; **Physics Letters A** 348: 355-360 (2006).

GLORY, J., BONETTI, M., HELEZEN, M., MAYNE-L'HERMITE, M., REYNAUD, C, Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes. **Journal of Applied Physics** 103 (2008).

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

HOSSEINI, M., GHADER, S. A model for temperature and particle volume fraction effect on nanofluid viscosity, **Journal of Molecular Liquids** 153: 139-145 (2010).

HWANG, Y., LEE, J.K., LEE, C.H., JUNG, Y.M., CHEONG, S.I., LEE, C.G., KU, B.C., JANG, S.P., Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, **Thermochimica Acta** 455: 70–74 (2007).

INCERPI, P.A. Incerteza de medição – método proposto para a análise da conformidade do produto. 139f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (2008).

JABARDO, J.M.S., Relatório técnico sobre a condutividade térmica de nanofluidos, Universidade da Coruña, Espanha (2012).

JACKSON, J., **Investigation into the pool-boiling characteristics of gold nanofluids**, M.S. thesis, University of Missouri-Columbia, Columbia, Mo, USA, (2007).

JANA, S., SALEHI-KHOJIN, A., ZHONG, W.H., Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition, of single and hybrid nano-additives, **Thermochimica Acta** 462: 45–55 (2007).

JANG, S.P., CHOI, S.U.S., Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids; **Applied Physics Letters** 84 vol 21 (2004).

JANG, S.P., LEE, J.H., HWANG, K.S., LEE, B.H., KIM, J.H., Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 51: 2651-2656 (2008).

JIANG, W., DING, G., PENG, H., Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants, **International Journal of Thermal Sciences** 48:1108-1115 (2009).

KANG, S.W., WEI, W.C., TSAI, S.H., YANG, S.Y., Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance, **Applied Thermal Engineering** 26: 2377-2382 (2006).

KAO, M.J., LO, C.H., TSUNG, T.T., WU, Y.Y., JWO, C.S., LIN, H.M., Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc-submerged nanoparticle synthesis system, **Journal of Alloys and Compounds** 434-435: 672-674 (2007).

KARTHIKEYAN, N.R., PHILIP, J., RAJ, B., Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids, **Materials Chemistry and Physics** 109: 50-55 (2008).

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** 45: 855-863 (2002).

KIM, S.J., BANG, I.C., BUONGIORNO, J., HUB, L.W., Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids, **Bulletin of The Polish Academy of Sciences** 55, No. 2 (2007).

KIM, S.J., BANG, I.C., BUONGIORNO, J., HUB, L.W., Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 50: 4105–4116 (2007).

KLEINSTREUER, C, KOO, J., A new thermal conductivity model for nanofluids, **Journal of Nanoparticle Research** 6: 577-588 (2004).

KLEINSTREUER, C., LI, J., KOO, J., Microfluidics of nano-drug delivery," **International Journal of Heat and Mass Transfer** 51: 5590–5597 (2008).

KOLE, M., DEY, T.K., Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant, **Experimental Thermal and Fluid Science** 34:677-683 (2010).

KOLE, M., DEY, T.K., Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide-gear oil nanofluids, **International Journal of Thermal Sciences** 50: 1741-1747 (2011).

KOSMALA, A., WRIGHT, R., ZHANG, Q., KIRBY, P., Synthesis of silver nano particles and fabrication of aqueous Ag inks for inkjet printing, **Materials Chemistry and Physics** 129: 1075-1080 (2011).

LEE, J., MUDAWAR, I., Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 50: 452–463 (2007).

LEE, J.H., HWANG, K.S., JANG, S.P., LEE, B.H., KIM, J.H., CHOI, S.U.S., CHOI, C.J., Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 51: 2651–2656 (2008).

LEE, S.W., PARK, S.D., KANG, S., BANG, I.C., KIM, J.H., Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 54: 433–438 (2011).

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** 8: 245–254 (2006).

LEE, C.H., PETERSON, G.P., The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids, **Journal of Applied Physics** 101, id 044312 (2007).

LU, K., ZHAO, J., Equiaxed zinc oxide nanoparticle synthesis, **Chemical Engineering Journal** 160: 788–793 (2010).

MA, H.B., WILSON, C., BORGMEYER, B., Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe, **Applied Physics Letters** 88 no. 14, 143116 (2006).

MA, H.B., WILSON, C., YU, Q., PARK, K., CHOI, S.U.S., TIRUMALA, M., An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe, **Journal of Heat Transfer** 128: 1213–1216 (2006).

MAIGA, S.E.B., NGUYEN, C.T., GALANIS, N., ROY, G., Hydrodynamic and thermal behaviours in a uniformly heated tube. **Computational studies, Southampton**, SO40 7AA, United Kingdom, Portugal, vol. 5: 453-462 (2004)

MASOUMI, N. SOHRABI, N., BEHZADMEHR, A., A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, **University of Sistan and Baluchestan**, PO Box 98164-161 (2009).

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

MINTSA, H.A., ROY, G., NGUYEN, C.T., DOUCET, D., New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, **International Journal of Thermal Sciences** 48: 363–371 (2009).

MOOSAVI, M., GOHARSHADI, E.K., YOUSSEFI, A., Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids, **International Journal of Heat and Fluid Flow** 31, Issue 4: 599-605 (2010).

MOTTA, F.C., **Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água**, 104 f., Tese (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2012).

MURSHED, S.M.S., LEONG, K.C., YANG, C., Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, **International Journal of Thermal Sciences** 47: 560–568 (2008).

NAMBURU, P.K., KULKARNI, D.P., MISRA, D., DAS, D.K., Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, **Experimental Thermal and Fluid Science** 32: 397–402 (2007).

NGUYEN, C.T., DESGRANGES, F., GALANIS, N., ROY, G., MARÉD, T., BOUCHER, S., MINTSA, H.A., Viscosity data for Al₂O₃–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?, **International Journal of Thermal Sciences** 47: 103–111 (2008).

OH, D.H., JAIN, A., EATON, J.K., GOODSON, K.E., LEE, J.S., Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the 3w method, **International Journal of Heat and Fluid Flow** 29: 1456–1461 (2008).

PAUL, G., SARKAR, S., PAL, T., DAS, P.K., MANNA, I., Concentration and size dependence of nano-silver dispersed water based nanofluids, **Journal of Colloid and Interface Science** 371: 20-27 (2012).

POHL, D.W., SCHWARZ, S.E., IRNIGER, V, Forced Rayleigh Scattering, **Physical Review letters** (1973).

PRASHER, R., EVANS, W., MEAKIN, P., FISH, J., PHELAN, P., KEBLINSKI, P., Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids, **Applied Physics Letters** 89: 143119 (2006).

ROUTBORT, J., Development and Demonstration of Nanofluids for Industrial Cooling Applications, **Argonne National Lab, Michellin North America**, St. Gobain Corp., (2009).

SANJAYA, C.S., WEE, T.H., TAMILSELVAN, T., Regression analysis estimation of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus, **Applied Thermal Engineering** 31: 1566 - 1575 (2011).

SANTOS, J.M.B.L., **Projecto Faraday, Texto 12º ano**, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal (2007).

SHALKEVICH, N., ESCHER, W., BUERGI, T., MICHEL, B., SI-AHMED, L., POULIKAKOS, D., **On the thermal conductivity of gold nanoparticle colloids** (2009).

SINGH, D., TOUTBORT, J., CHEN, G., Heavy vehicle systems optimization merit review and peer evaluation, **Annual Report, Argonne National Laboratory** (2006).

SPANHEL, L., ANDERSON, M.A., Semiconductor clusters in the sol-gel process—quantized aggregation, gelation, and crystal-growth in concentrated ZnO colloids, **Journal of American Chemical Society** 113: 2826–2833 (1991).

TAMJID, E., GUENTHER, B.H., Rheology and colloidal structure of silver nanoparticles dispersed in diethylene glycol, **Powder Technology** 197: 49-53 (2010).

VAND, V., Viscosity of solutions and suspensions I: Theory, **Journal of Physical and Colloid Chemistry** 52: 277-299 (1948).

VENERUS, D.C., KABADI, M.S., LEE, S., PEREZ-LUNA, V., Study of thermal transport in nanoparticle suspensions using forced Rayleigh scattering, **Journal of Applied Physics** 100, 094310 (2006).

WAGENER, M., GUNTHER, B., Sputtering on liquids - a versatile process for the production of magnetic suspensions?, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 201: 41-44 (1999).

WANG, X., XU, X., CHOI, S.U.S., Thermal conductivity of nanoparticles– fluid mixture, **Journal of Thermophysics and Heat Transfer** 13 (4): 474–480 (1999).

WEN, D., Nanofuel as a potential secondary energy carrier, **Energy & Environmental Science**, ID: 10.1039/b906384f (2010).

XIE, H., FUJII, M., ZHANG, X., Effect of interfacial layer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, **International Journal of Heat and Mass Transfer** 48: 2926-2932 (2005).

- XIE, H., LEE, H., YOUN, W., CHOI, M., Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, **Journal of Applied Physics** volume 94, number 8: 4967-4971 (2003).
- XUE, Q.Z., Model for effective thermal conductivity of nanofluids, **Physics Letters A** 307: 313-317 (2003).
- XUE, Q.;XU, W.M.; A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells; **Materials Chemistry and Physics** 90: 298-301 (2005).
- YAN, J.F. LIU, J. Nanocryosurgery and its mechanisms for enhancing freezing efficiency of tumor tissues, **Nanomedicine** 4, no. 1: 79–87 (2008).
- YOO, D.H., HONG, K.S., YANG, H.S., Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids, **Thermochemica Acta** 455: 66–69 (2007).
- YU, W., XIE, H., CHEN, L., LI, Y., Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, **Thermochemica Acta** 491: 92–96 (2009).
- ZHANG, X., GU, H, FUJII, M., Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, **Experimental Thermal and Fluid Science** 31: 593–599 (2007).
- ZHANG, X., GU, H., FUJII, M., Experimental Study on the Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids, **International Journal of Thermophysics** 27, No. 2 (2006).
- ZHOU, L.P., WANG, B.X., Experimental research on the thermophysical properties of nanoparticle suspensions using the quasi-steady state method, in: **Ann. Proc. Chinese Eng. Thermophys.**, Shanghai, pp. 889–892 (2002).
- ZIEBLAND, H., in *Thermal Conductivity*, edited by R. P. **Tye Academic, London**, Vol. 2: 65–148 (1969).

APÊNDICE A

UNIVERSIDADES PARTICIPANTES DO ESTUDO DE REFERÊNCIA DE BUONGIORNO ET AL. (2009)

Tabela A.1. – Lista de universidades

1	<i>Massachusetts Institute of Technology (MIT), 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, Massachusetts 02139, USA</i>
2	<i>Illinois Institute of Technology, 10 W. 33rd St., Chicago, Illinois 6016, USA</i>
3	<i>Olin College of Engineering, Olin Way, Needham, Massachusetts 02492, USA</i>
4	<i>Kent State University, Williams Hall, Kent, Ohio 44242, USA</i>
5	<i>Materials Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), 110 8th Street, Troy, New York 12180, USA</i>
6	<i>Texas A&M University, MS 3367, College Station, Texas 77843, USA</i>
7	<i>School of Energy Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, San 194 Banyeon-ri, Eonyang-eup, Uju-gun, Ulsan Metropolitan City, Republic of Korea</i>
8	<i>Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan</i>
9	<i>Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), IRAMIS, 91191 Gif sur Yvette, France</i>
10	<i>METSS Corporation, 300 Westdale Avenue, Westerville, Ohio 43082, USA</i>
11	<i>Department of Aerospace Engineering, University of Naples, P.le V. Tecchio 80, 80125 Naples, Italy</i>
12	<i>SASOL of North America, 2201 Old Spanish Trail, Westlake, Louisiana 70669-0727, USA</i>
13	<i>University of Leeds, Clarendon Road, Leeds LS2 9JT, United Kingdom</i>
14	<i>Department of Mechanical Engineering and Materials Science, University of Pittsburgh, 648 Benedum Hall, 3700 O'Hara Street, Pittsburgh, Pennsylvania 15261, USA</i>
15	<i>Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology-Madras, Chennai 600036, India</i>
16	<i>Université Libre de Bruxelles, Chimie-Physique E.P. CP 165/62 Avenue P.Heger, Bat. UD3, Bruxelles 1050, Belgium</i>
17	<i>Department of Chemical and Processing Engineering, Silesian University of Technology, ul. M. Strzody 7, 44-100 Gliwice, Poland</i>
18	<i>Department of Nuclear Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27695-7909, USA</i>
19	<i>Zurich Research Laboratory, IBM Research GmbH, Säumerstr. 4, CH-8803 Rüschlikon, Switzerland</i>
20	<i>Department of Mechanical and Process Engineering, Laboratory of Thermodynamics in Emerging Technologies, ETH Zurich, 8092 Zurich, Switzerland</i>
21	<i>Department of Physics, Chinese University of Hong Kong, G6, North Block, Science Center, Shatin NT Hong Kong, China</i>
22	<i>Stanford University, 440 Escondido Mall Rm 224, Stanford, California 94305, USA</i>
23	<i>Department of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico-Mayaguez, 259 Boulevard Alfonso Valdes, Mayaguez 00681, Puerto Rico</i>

Tabela A.1. (continuação) – Lista de universidades

24	<i>South Dakota School of Mines and Technology, 501 E Saint Joseph Street, Rapid City, South Dakota 57701, USA</i>
25	<i>School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, 100, Hwajeon-dong, Deogyang-gu, Goyang-city, Gyeonggi-do 412-791, Republic of Korea</i>
26	<i>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798, Singapore</i>
27	<i>Institute for Thermodynamics, Helmut-Schmidt University Hamburg, D-22039 Hamburg, Germany</i>
28	<i>National Institute of Standards and Technology (NIST), MS 863, Gaithersburg, Maryland 20899, USA</i>
29	<i>DSO National Laboratories, 20 Science Park Drive, Singapore 118230, Singapore</i>
30	<i>Korea University, Anam-dong, Sungbuk-ku, Seoul 136-713, Republic of Korea</i>
31	<i>Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology-Kharagpur, West Bengal 721302, India</i>

APÊNDICE B

VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA SIMULADOS

No capítulo 3, foram realizadas diversas comparações entre correlações e resultados experimentais para a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos. Nesta seção, são apresentadas as curvas de validação para os modelos implementados. Para tanto, foram coletadas as curvas apresentadas pelos autores dos modelos, e as equações foram simuladas nas mesmas condições. Os pontos sobre as curvas foram extraídos utilizando o Windig 2.5.

A tabela B.1 mostra as discrepâncias máximas entre os valores dos modelos e as equações simuladas neste trabalho. Já as Figs. B.1 a B.5 mostram as curvas de validação para estas equações. Com base no pequeno erro observado, pode-se afirmar que as equações implementadas reproduzem com precisão os modelos de previsão da condutividade térmica de nanofluidos.

Tabela B.1 – Discrepância entre os modelos para condutividade térmica e curvas implementadas.

Modelo	Φ (%)	erro máximo (%)
Gao e Zhou	4,895	0,2161
Leong	4,993	0,9695
Xie	4,926	0,6549
Xue	4,979	0,318
Xue e Xu	5	0,02512

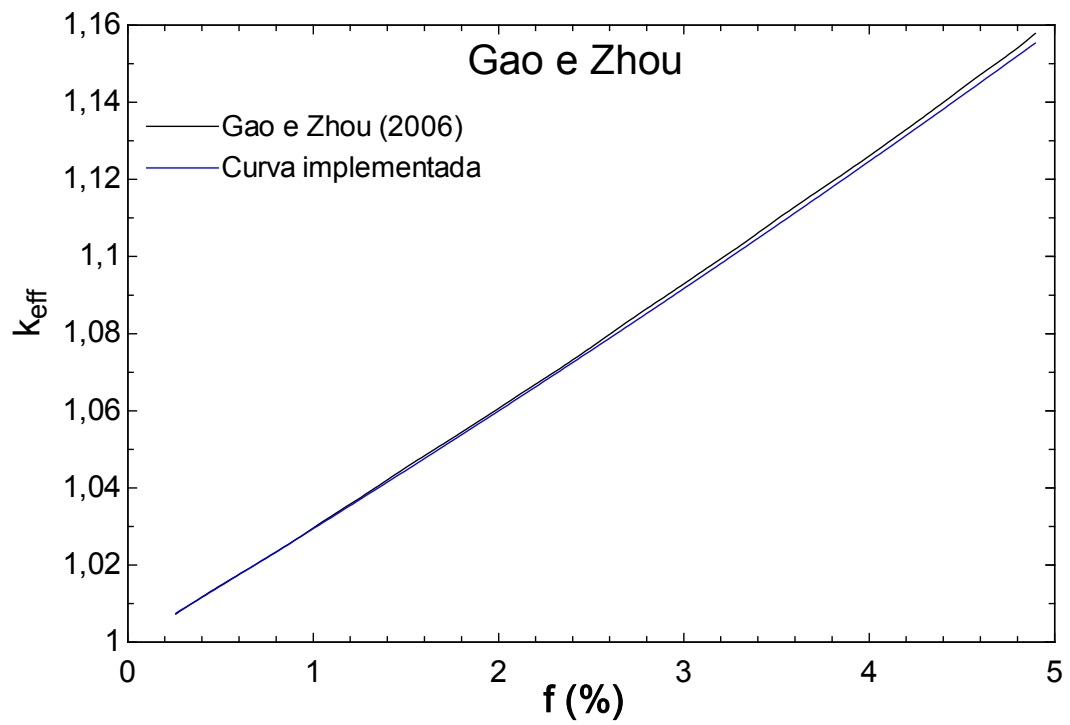


Figura B.1 – Curva de validação para o modelo de Gao e Zhou (2006).

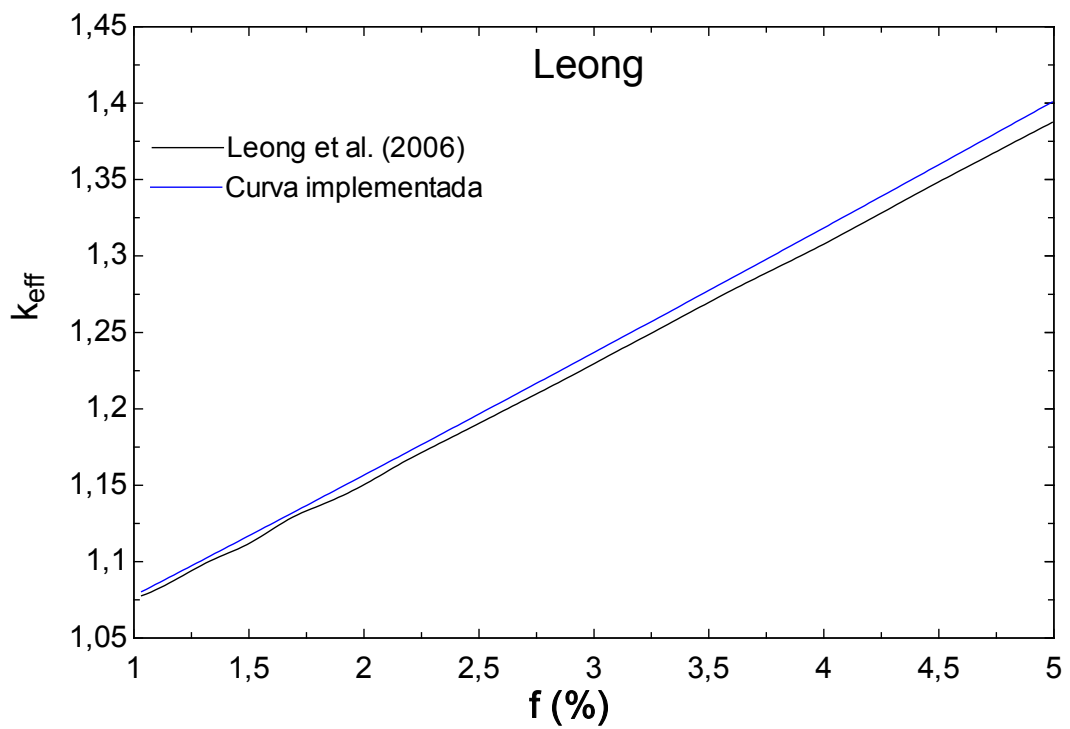


Figura B.2 – Curva de validação para o modelo de Leong et al. (2006).

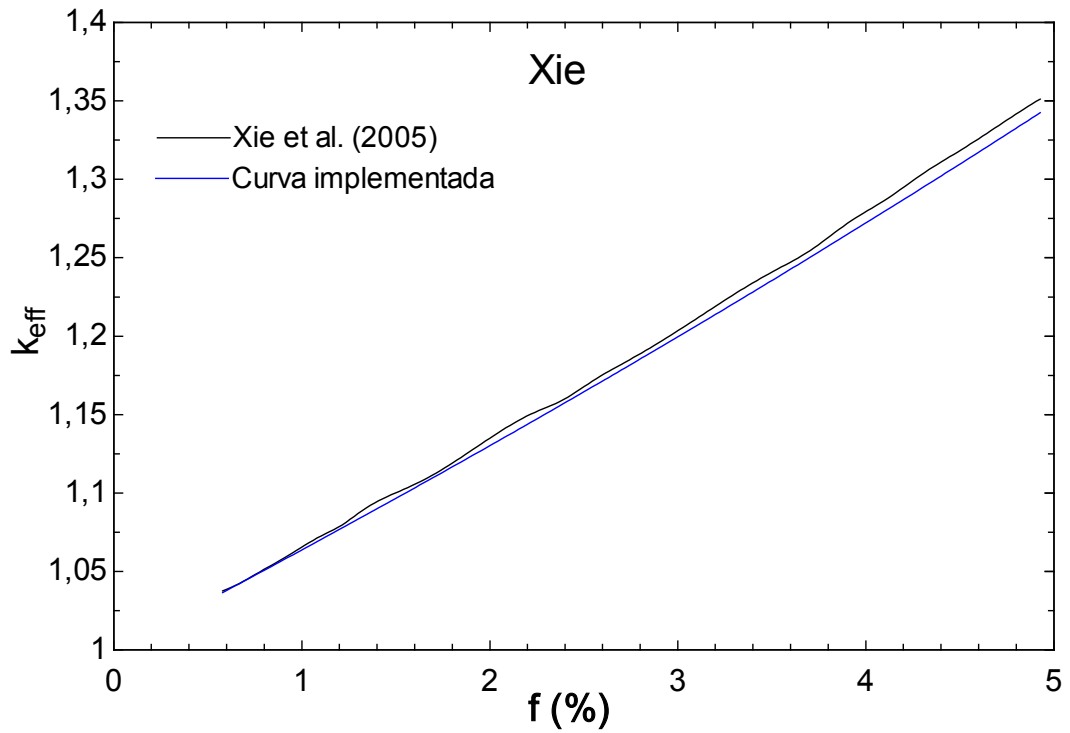


Figura B.3 – Curva de validação para o modelo de Xie et al. (2005).

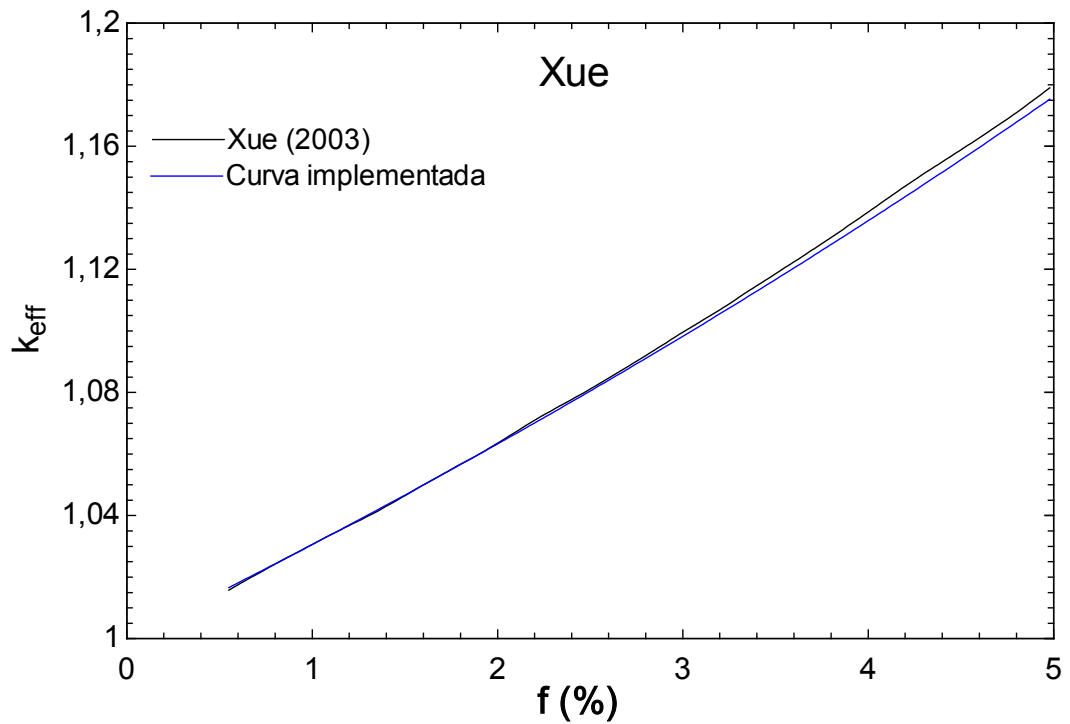


Figura B.4 – Curva de validação para o modelo de Xue (2003).

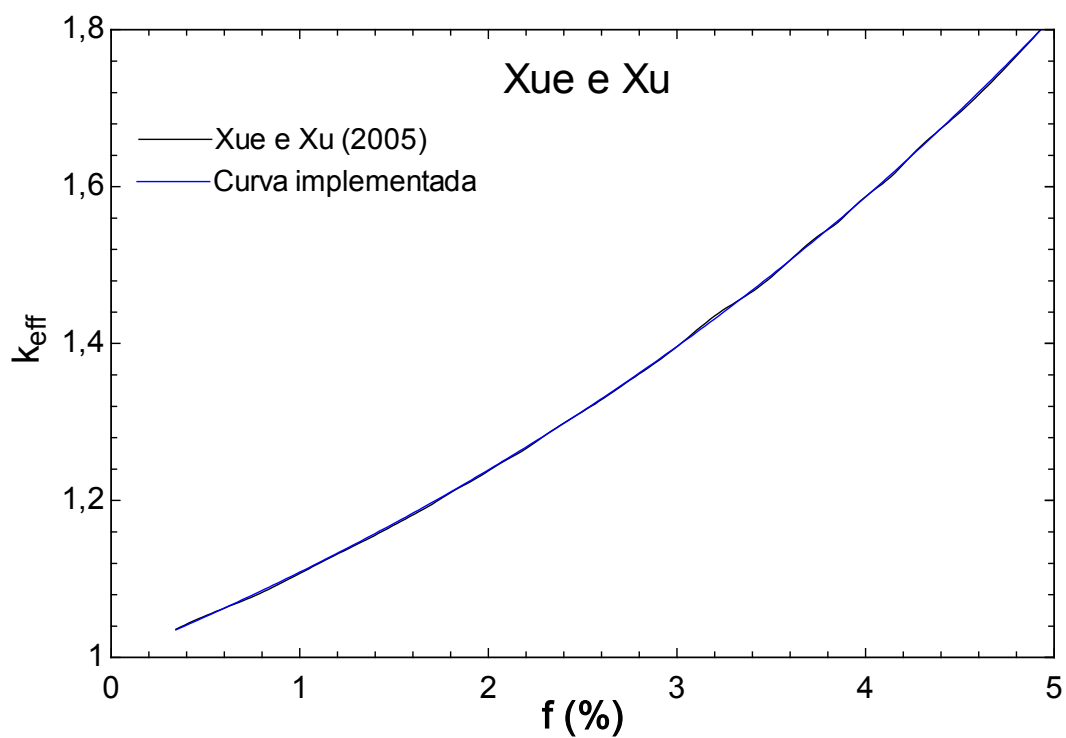


Figura B.5 – Curva de validação para o modelo de Xue e Xu (2005).