

**DOUGLAS HECTOR FONTES**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE  
DISPERSÕES À BASE DE ÓLEO DE  
TRANSFORMADOR ELÉTRICO EM CAVIDADES  
FECHADAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2015

**DOUGLAS HECTOR FONTES**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE DISPERSÕES À  
BASE DE ÓLEO DE TRANSFORMADOR ELÉTRICO EM  
CAVIDADES FECHADAS**

**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

Co-orientador: Prof. Dr. Elie Luis Martínez Padilla

Uberlândia - MG

2015

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

---

F683s  
2015

Fontes, Douglas Hector, 1990-  
Simulação numérica do escoamento de dispersões à base de óleo de transformador elétrico em cavidades fechadas / Douglas Hector Fontes. - 2015.  
143 f. : il.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.  
Coorientador: Elie Luis Martínez Padilla.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Nanopartículas - Teses. 3. Transformadores elétricos - Teses. 4. Calor - Transmissão - Teses. I. Bandarra Filho, Enio Pedone. II. Martínez Padilla, Elie Luis, 1967- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

*"Ao Rei, Soberano, Santo, meu Salvador, Jesus."*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao autor da vida, de quem vem toda a boa dádiva e todo o dom perfeito, Àquele que possui toda a ciência e sabedoria, ao único Deus, por todas as boas coisas que me permite realizar e por todas as más coisas que me impede de fazer, enfim, por tudo;

Aos meus pais, Hamilton e Luciene, por serem um porto seguro e por depositarem confiança em mim;

Ao grupo do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia, LEST-nano, pelas discussões e reflexões sobre fenômenos físicos e pelo auxílio na elaboração deste documento;

Ao professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela orientação e apoio fornecidos para o desenvolvimento da pesquisa, e por ter sido um motivador singular frente aos desafios que surgiram;

Ao professor Dr. Elie Luis Martínez Padilla, pela essencial coorientação, auxiliando no desenvolvimento do código numérico e na apresentação dos resultados numéricos;

Ao professor Dr. Gherhardt Ribatski, por disponibilizar os equipamentos do Laboratório de Refrigeração, da Escola de Engenharia de São Carlos, USP-EESC, e ao estudante Tiago Augusto Moreira, pelo auxílio nas medições da condutividade térmica das amostras;

Ao professor Dr. José Alberto dos Reis Parise, pelas breves, mas valiosas orientações,

e por ter nos dado acesso para realizar as medidas de viscosidade das amostras no Laboratório de Reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio;

À equipe do Laboratório de Reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, na pessoa da mestre Alexandra Araújo Aliche, pela excepcional disposição na realização das medições de viscosidade das amostras;

Ao professor Dr. José Roberto Camacho, pelo suporte teórico fornecido por meio de conversas e disponibilização de material sobre transformadores elétricos, por fornecer o óleo de transformador elétrico, utilizado para obtenção das amostras, e por permitir a realização das medições da rigidez dielétrica das amostras no Laboratório de Ensaios de Transformadores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia;

Ao técnico Rubens Aparecido Assunção do Laboratório de Ensaios de Transformadores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, por me acompanhar na realização das medidas de rigidez dielétrica das amostras;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro, por meio da bolsa de estudos;

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio à pesquisa e ao financiamento na participação de congressos nacionais;

Finalmente, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que este trabalho fosse realizado.

FONTES, D. H., **Simulação Numérica do Escoamento de Dispersões à base de Óleo de Transformador Elétrico em Cavidades Fechadas** 2015. 143 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de analisar a transferência de calor, por convecção natural, de dispersões coloidais de nanopartículas em óleo de transformador elétrico no interior de cavidades fechadas. No cumprimento deste objetivo foram realizadas medições de algumas propriedades das dispersões de nanopartículas de diamante e nanotubos de carbono em óleo de transformador elétrico, produzidas por um método de dois passos: condutividade térmica, pelo método transiente do fio quente; viscosidade dinâmica, por meio de reômetros de cilindros concêntricos com tensão cisalhante controlada e rigidez dielétrica, com um analisador de rigidez dielétrica de ajuste manual. Os resultados destas medições foram utilizados nas simulações numéricas do escoamentos das dispersões e do óleo de transformador elétrico em cavidades fechadas. Os resultados numéricos foram obtidos por meio de dois códigos numéricos, baseados no Método dos Volumes Finitos (MVF), um para escoamentos 2D, que teve seu desenvolvimento como parte integrante deste trabalho, e o outro para escoamentos 3D, desenvolvido anteriormente. Os resultados mostraram que, em termos da transferência de calor, as dispersões de nanopartículas incrementaram o coeficiente de transferência de calor do óleo puro em até 23% para um mesmo número de Grashof. Porém, o uso de nanopartículas levou a uma redução de 95% na rigidez dielétrica do óleo puro. Portanto, estes resultados são de grande importância em termos da aplicabilidade de dispersões de nanopartículas em transformadores elétricos.

*Palavras-chave: Nanopartículas, Óleo de transformador elétrico, Convecção Natural, Simulação numérica.*

FONTES, D. H., **Numerical Simulation of the flow of Dispersions based on Transformer Oil in Closed Cavities** 2015. 143 f. M. Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

This work had the purpose to analyze the heat transfer, promoted by buoyancy forces, of colloidal dispersions of nanoparticles in transformer oil inside closed cavities. To achieve this purpose, measurements of some properties of the dispersions of diamond and carbon nanotubes in transformer oil, produced by a two-step method, were made: thermal conductivity, by the transient hot wire method; dynamic viscosity, by rheometers of concentric cylinders with shear stress controlled; and dielectric strength, with a dielectric strength analyzer of manual adjust. The results of these measurements were used in numerical simulations of the flows of the dispersions and of the transformer oil inside closed cavities. The numerical results were obtained via two numerical codes, based on Finite Volume Method (FVM), one for 2D flows, that had its development as part of this work, and the other for 3D flows, previously developed. The results showed that, in terms of heat transfer, the nanoparticles dispersions have increased about 23% the convection heat transfer coefficient of the pure oil for a same Grashof number. However, the use of these nanoparticles led a reduce of 95% in the dielectric strength of the pure oil. Therefore, these results are very important in terms of the applicability of nanoparticles dispersions in electrical transformers.

*Keywords: Nanoparticles, Electrical Transformer Oil, Natural Convection, Numerical Simulation.*



## Lista de Figuras

2.1	Valores de condutividade térmica de alguns sólidos e líquidos à temperatura de 25 °C (dados obtidos no programa <i>Engineering Equation Solver-EES</i> ). . . . .	7
2.2	Características geométricas de uma nanopartícula na forma de elipsoide. . . . .	29
2.3	Expressões baseadas na teoria do meio efetivo para avaliação da condutividade térmica de nanofluidos. . . . .	30
2.4	Tipos de comportamento de fluidos. . . . .	32
3.1	Ilustração de um transformador elétrico. . . . .	45
3.2	Esquema representativo no interior de um transformador elétrico. . . . .	45
3.3	Configuração A para modelagem física do problema. . . . .	46
3.4	Configuração B para modelagem física do problema. . . . .	47
3.5	Diagrama de malha ortogonal, deslocada e não uniforme. . . . .	55
3.6	Homogeneizador a alta pressão. . . . .	62
3.7	Imagem do MET, modelo EM-109 da ZEISS. . . . .	64
3.8	Imagens obtidas no MET das nanopartículas de diamante e de MWCNT. . . . .	65
3.9	Balança com resolução de um milésimo de grama. . . . .	67
3.10	Amostras de OTE e dispersões. . . . .	68
3.11	Aparato experimental do método do fio quente. . . . .	70

3.12	Reômetros utilizados nas medições das viscosidades das amostras. . . . .	71
3.13	Cilindros concêntricos utilizados para avaliar o comportamento reológico. . . .	71
3.14	Medidor de rigidez dielétrica ElectricTestSerta. . . . .	73
4.1	Comparação dos incrementos na condutividade térmica com os obtidos por outros autores. . . . .	76
4.2	Comportamento reológico das dispersões de nanopartículas em OTE. . . . .	78
4.3	Rigidez dielétrica das dispersões de nanopartículas em OTE. . . . .	81
4.4	Campos de velocidade dos vórtices de Taylor e Green (1937). . . . .	84
4.5	Avaliação do erro, por meio da norma $L_2$ , comparada a um decaimento de segunda ordem. . . . .	85
4.6	Perfis de velocidade em seções médias da cavidade com tampa deslizante, $Re=100$ . . . . .	86
4.7	Perfis de velocidade em seções médias da cavidade com tampa deslizante, $Re=400$ . . . . .	87
4.8	Perfis de velocidade ao longo de linhas médias da cavidade, configuração A, forma 2D, $Gr=10^6$ . . . . .	90
4.9	Refinamento na região da parede, com taxa de crescimento de 5% dos volumes, malha 30x30. . . . .	90
4.10	Perfil da componente de velocidade $V$ ao longo ao longo da linha $X=0,5$ , configuração B, forma 2D, $Gr=10^3$ . . . . .	91
4.11	Perfis de velocidade ao longo de linhas médias da cavidade em $Z=0,5$ , configuração A, forma 3D. . . . .	92
4.12	Perfis de velocidade ao longo ao longo de linhas em $X=0,5$ e $Y=0,8$ da cavidade no plano em $Z=0,5$ , configuração B, forma 3D. . . . .	93

4.13 Campos de temperatura e linhas de corrente do escoamento do OTE no interior da cavidade, configuração A. . . . .	94
4.14 Campos de temperatura do OTE no interior da cavidade, configuração B. . . .	95
4.15 Números de Nusselt em função da concentração volumétrica, configuração A. .	97
4.16 Números de Nusselt em função da concentração volumétrica, configuração B. .	98
4.17 Comparação do Nusselt com correlação. . . . .	100
4.18 Perfis de velocidade ao longo de linhas específicas. . . . .	101
4.19 Detalhe dos perfis de velocidade ao longo de linhas específicas. . . . .	102
4.20 Coeficiente relativo de convecção das dispersões de nanopartículas. . . . .	103
4.21 Iso-superfícies e linhas de corrente de OTE no interior da configuração A. . . .	105
4.22 Campo de número de Nusselt local na face aquecida do escoamento de OTE no interior da configuração A. . . . .	106
4.23 Iso-superfícies e linhas de corrente de OTE no interior da configuração B. . . .	107
4.24 Linhas de corrente que conectam as principais recirculações do escoamento de OTE no interior da configuração B. . . . .	108
4.25 Campo de Nusselt do escoamento de OTE nas superfícies da configuração B. .	109

## Lista de Tabelas

2.1	Resultados experimentais da condutividade térmica de vários nanofluidos - Buongiorno et al. (2009). . . . .	19
2.2	Influência da concentração e temperatura sobre a viscosidade. . . . .	33
2.3	Algumas expressões clássicas para estimar viscosidade de dispersões. . . . .	37
3.1	Resumo da modelagem matemática. . . . .	52
3.2	Condições do escoamento, analisadas numericamente. . . . .	61
3.3	Algumas características e propriedades das nanopartículas utilizadas. . . . .	63
3.4	Denominações das dispersões e massas de nanopartículas necessárias para obtenção das dispersões. . . . .	66
3.5	Medições das massas para uma série de amostras. . . . .	67
4.1	Resultados das medições de condutividade térmica das amostras. . . . .	75
4.2	Resultados das medições de viscosidade dinâmica das amostras. . . . .	79
4.3	Resultados das medições de rigidez dielétrica das amostras. . . . .	80
4.4	Propriedades físicas das amostras, utilizadas para as simulações. . . . .	81
4.5	Comparação dos resultados de convecção natural do presente trabalho com os de outros autores, $Pr=0,7$ . . . . .	87
4.6	Números de Nusselt nas superfícies da cavidade e do núcleo aquecido. . . . .	110

## Lista de Símbolos

### Letras latinas

$c_p$	- calor específico [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$d$	- diâmetro da partícula [ $m$ ]
$D$	- fator difusivo do movimento browniano
$f$	- função genérica
$\vec{g}$	- vetor aceleração da gravidade [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$Gr$	- número de Grashof
$h$	- coeficiente de transferência de calor [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$m$	- massa [ $kg$ ]
$n$	- fator de forma de uma partícula ou versor normal à superfície
$N_x$	- número de volumes na direção do eixo $x$
$N_y$	- número de volumes na direção do eixo $y$
$N_z$	- número de volumes na direção do eixo $z$
$Nu$	- número de Nusselt
$p$	- pressão modificada [ $Pa$ ] ou razão entre diâmetros de uma partícula elipsoidal
$\tilde{p}$	- pressão [ $Pa$ ]
$Pr$	- número de Prandtl
$q'$	- calor por unidade de comprimento [ $W \cdot m^{-1}$ ]
$q''$	- calor por unidade de área [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$Q$	- energia na forma de calor [ $J$ ]
$R_K$	- resistência Kapitza [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]

$Re$	- número de Reynolds
$sc$	- superfície de controle dimensional [ $m^2$ ]
$SC$	- superfície de controle adimensional
$t$	- tempo [ $s$ ]
$T$	- temperatura [ $K$ ]
$u$	- componente x do vetor velocidade dimensional [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$U$	- componente X do vetor velocidade adimensional
$v$	- componente y do vetor velocidade dimensional [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$V$	- componente Y do vetor velocidade adimensional
$vc$	- volume de controle [ $m^3$ ]
$VC$	- volume de controle adimensional
$w$	- componente z do vetor velocidade dimensional [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$W$	- componente Z do vetor velocidade adimensional
$x$	- coordenada espacial dimensional [ $m$ ]
$X$	- coordenada espacial adimensional
$y$	- coordenada espacial dimensional [ $m$ ]
$Y$	- coordenada espacial adimensional
$z$	- coordenada espacial dimensional [ $m$ ]
$Z$	- coordenada espacial adimensional

#### Letras gregas

$\alpha$	- difusividade térmica [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$\beta$	- coeficiente de expansão volumétrica [ $K^{-1}$ ]
$\delta$	- delta de Kronecker e diferença finita de uma variável
$\Delta$	- variação de uma determinada propriedade
$\theta$	- temperatura adimensional
$\kappa$	- condutividade térmica [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\kappa_B$	- constante de Boltzmann [ $J \cdot K^{-1}$ ]
$\lambda$	- coeficiente de interpolação
$\mu$	- viscosidade dinâmica [ $Pa \cdot s$ ]
$\nu$	- viscosidade cinemática [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$\pi$	- razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência
$\rho$	- massa específica [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\tau$	- tensão cisalhante [ $Pa$ ]
$\tau_c$	- escala de tempo para que o calor se difunda em uma distância equivalente à escala do comprimento característico de uma partícula [ $s$ ]
$\tau_d$	- escala de tempo para uma partícula deslocar seu comprimento característico [ $s$ ]
$\phi$	- concentração volumétrica
$\varphi$	- variável genérica
$\psi$	- esfericidade, definida pela razão entre a área superficial de uma esfera, de mesmo volume de uma partícula e a área superficial desta partícula

#### Abreviações

CDS	- Esquema de Diferenças Centrais
CNT	- Nanotubos de carbono
MDF	- Método das Diferenças Finitas
MEF	- Método dos Elementos Finitos
MET	- Microscópio Eletrônico de Transmissão
MVF	- Método dos Volumes Finitos
MWCNT	- Nanotubos de carbono de paredes múltiplas

ODI1	- amostra 1 da dispersão de diamante em óleo de transformador elétrico
ODI2	- amostra 2 da dispersão de diamante em óleo de transformador elétrico
ODI3	- amostra 3 da dispersão de diamante em óleo de transformador elétrico
ONT1	- amostra 1 da dispersão de MWCNT em óleo de transformador elétrico
ONT2	- amostra 2 da dispersão de MWCNT em óleo de transformador elétrico
ONT3	- amostra 3 da dispersão de MWCNT em óleo de transformador elétrico
OTE	- óleo de transformador elétrico
PUC-Rio	- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SWCNH	- Nano trompas de carbono de parede simples
UFU	- Universidade Federal de Uberlândia
USP-EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade São Paulo

#### Subscritos

$fb$	- fluido de base
$H$	- índice para superfície aquecida
$i$	- índice da notação tensorial
$j$	- índice da notação tensorial
$L$	- índice para superfície resfriada
$nf$	- nanofluido
$np$	- nanopartícula
$r$	- razão entre propriedades do nanofluido e fluido de base



## Sobrescritos

- $t$  - sobrescrito para indicar variável no instante atual
- $t + 1$  - sobrescrito para indicar variável no instante posterior
- $*$  - sobrescrito para indicar variável aproximada

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Estrutura da dissertação . . . . .	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1 Motivação na obtenção de dispersões . . . . .	6
2.2 Implicações da nanotecnologia sobre as dispersões . . . . .	8
2.3 Preparação de nanofluidos . . . . .	9
2.3.1 Método de um passo . . . . .	10
2.3.2 Método de dois passos . . . . .	11
2.4 Propriedade dos nanofluidos . . . . .	13
2.4.1 Massa específica . . . . .	14
2.4.2 Calor específico . . . . .	15
2.4.3 Condutividade térmica . . . . .	16
2.4.4 Viscosidade . . . . .	31

2.4.5	Rigidez dielétrica . . . . .	38
2.5	Transporte convectivo em nanofluidos . . . . .	39
2.6	Aplicações com nanofluidos . . . . .	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>44</b>
3.1	Modelagem física . . . . .	44
3.2	Modelagem matemática . . . . .	48
3.3	Metodologia numérica . . . . .	54
3.3.1	Discretização - Método dos Volumes Finitos . . . . .	54
3.3.2	Esquema de interpolação . . . . .	57
3.3.3	Malha numérica . . . . .	57
3.3.4	Acoplamento pressão-velocidade . . . . .	58
3.3.5	Integração temporal . . . . .	61
3.3.6	Condições das análises numéricas . . . . .	61
3.4	Preparação dos nanofluidos . . . . .	62
3.5	Medição das propriedades . . . . .	69
3.5.1	Condutividade térmica . . . . .	69
3.5.2	Viscosidade dinâmica . . . . .	71
3.5.3	Rigidez dielétrica . . . . .	72
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>74</b>
4.1	Experimentais . . . . .	74
4.1.1	Condutividade térmica . . . . .	75

4.1.2	Viscosidade dinâmica . . . . .	77
4.1.3	Rigidez dielétrica . . . . .	79
4.2	Numéricos . . . . .	82
4.2.1	Verificação . . . . .	82
4.2.2	Validação . . . . .	85
4.2.3	Independência de malha . . . . .	89
4.2.4	Solução numérica bidimensional . . . . .	93
4.2.5	Solução numérica tridimensional . . . . .	104
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>111</b>

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

A crescente demanda de produção e aumento na eficiência dos mais diversos processos e equipamentos, roga a melhoria dos processos de troca térmica, pois estes estão presentes na maioria dos equipamentos e processos utilizados pelo homem.

A melhoria dos sistemas de troca térmica, requerida pelo aumento na produção e na eficiência da mesma, pode ser realizada por meio da mudança na configuração geométrica, ou por meio da modificação do fluido de troca térmica, de tal modo que este apresente melhores características térmicas.

Baseado na segunda alternativa para o aumento da eficiência dos sistemas de troca térmica, desde meados do século XIX, marcado pelos estudos de Maxwell (1873), concebeu-se a ideia de melhorar as propriedades físicas (não somente térmicas) de líquidos por meio da dispersão de partículas no mesmo. Nesta época porém, devido às limitações tecnológicas, somente partículas micrométricas ou milimétricas podiam ser produzidas de forma controlada, e tais partículas, quando dispersas no líquido, apresentavam diversos problemas que inviabilizavam a utilização das dispersões na melhoria das propriedades físicas dos líquidos, tais como, decantação das partículas, entupimento dos canais, erosão da parede das tubulações e aumento excessivo na perda de carga. Portanto, esta forma de tentar melhorar as propriedades dos líquidos de troca térmica esteve adormecida até início da década de 1990, quando, por

meio da nanotecnologia, partículas de dimensões nanométricas puderam ser fabricadas de forma controlada para serem utilizadas como meio disperso no líquido, em substituição de partículas micrométricas e milimétricas, minimizando os problemas associados a estas partículas.

Masuda et al. (1993) apresentou os primeiros resultados das propriedades termo-físicas de dispersões de nanopartículas em líquidos, dispersões de  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  em água. Tais resultados mostraram um aumento na condutividade térmica superior ao que era previsto pela equação de Maxwell (1873). Este fato impulsionou a pesquisa sobre dispersões de nanopartículas em líquidos, que recebeu de Choi e Eastman (1995) o termo nanofluidos, que foi aceito internacionalmente. A partir de então, nanofluidos se tornaram uma possível via para a melhoria das propriedades térmicas dos líquidos utilizados em sistemas de troca térmica, atendendo à necessidade global de melhorias nos sistemas de troca térmica.

Um dos equipamentos que pode haver possibilidade de aplicação de nanofluidos é o transformador elétrico, que normalmente contém no seu interior um líquido, que tem por objetivo retirar o calor produzido nos enrolamento e núcleo do transformador elétrico. Além da possibilidade na melhoria da transferência de calor com a utilização de nanofluidos, outro benefício pode ser alcançado se a dispersão de nanopartículas resultar numa melhoria na capacidade de isolamento elétrico do óleo (líquido normalmente utilizado no interior do transformador elétrico), expressa por sua rigidez dielétrica. O aumento na eficiência dos transformadores elétricos implica em impactos positivos em todo o sistema de geração e distribuição de energia, visto que, juntamente com geradores e reatores em usinas e subestações elétricas os transformadores são os itens de maior valor e porte (BECHARA, 2010).

Portanto, deseja-se que os transformadores elétricos operem nas condições adequadas, para que tenham uma vida útil maior possível com confiabilidade, haja vista sua importância e valor na transmissão e distribuição de energia elétrica. Assim, deve-se buscar mitigar os possíveis defeitos em transformadores elétricos, que podem ser provenientes de fenômenos térmicos, elétricos, magnéticos e mecânicos (SOUZA, 2008).

O aumento excessivo de temperatura no interior do transformador elétrico pode deteriorar os materiais no interior do transformador elétrico, ou reduzir a capacidade funcional

dos mesmos, levando a uma possível parada do equipamento para manutenção ou até mesmo substituição do mesmo. À vista disto, uma melhoria nas características térmicas do fluido utilizado para troca térmica no interior do transformador elétrico, pode reduzir a ocorrência de defeitos em transformadores elétricos; melhorar a eficiência na troca térmica; e/ou aumentar a capacidade dos transformadores elétricos, sem a necessidade de aumentar o tamanho dos mesmos.

O mecanismo de troca térmica no interior dos transformadores elétricos é normalmente promovido por convecção natural, onde o escoamento do fluido é resultante do desbalanço entre as forças peso e empuxo, devido à variação espacial da massa específica. Esta variação da massa específica, ocorre devido a uma diferença de temperatura sobre a qual o fluido é submetido. Maiores detalhes dos princípios do mecanismo de convecção natural podem ser encontrados em Incropera e DeWitt (2003) e Çengel (2009).

## **1.1 Objetivos**

O objetivo deste trabalho está relacionado à possibilidade de aumento na eficiência de troca térmica utilizando dispersões de nanopartículas em líquidos, visto que estas dispersões normalmente apresentam propriedades térmicas superiores, e ao fato de transformadores elétricos serem equipamentos de alto valor no sistema de geração e distribuição de energia elétrica, que têm usualmente como mecanismo de troca térmica a convecção natural.

Assim, pode-se enunciar como objetivo geral deste trabalho: analisar numericamente as alterações na transferência de calor por convecção natural no interior de cavidades fechadas, utilizando dispersões de nanopartículas de diamante e nanotubos de carbono (MWCNT) em óleo, em relação ao óleo puro. Deve-se notar que, as nanopartículas de MWCNT, devido à sua organização atômica, são consideradas partículas condutoras ou semi-condutoras elétricas, conforme Da Fonseca (2011), enquanto que, as nanopartículas de diamante, são partículas não condutoras elétricas.

Além do objetivo geral, pode-se enunciar os seguintes objetivos específicos deste

trabalho:

- desenvolver um código computacional para simulação de escoamentos bidimensionais promovidos por convecção natural em cavidades fechadas;
- utilizar código computacional já desenvolvido para simulação de escoamentos tridimensionais, com o fim de obter resultados qualitativos do escoamento;
- realizar dispersão de nanopartículas de diamante e de nanotubos de carbono em óleo de transformador elétrico, por meio de um método físico;
- caracterizar as dispersões e o óleo puro, por meio de medições experimentais e correlações teóricas;
- realizar testes de rigidez dielétrica das dispersões e do óleo puro;

Tendo sido expostos os objetivos deste trabalho, é apresentado na sequência a estrutura na qual foi redigida esta dissertação.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

Objetivando tornar a apresentação deste trabalho sequencialmente coerente, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, iniciando pelo presente capítulo, onde é feita uma introdução da dissertação, sendo expostas as justificativas ao trabalho, bem como os objetivos do mesmo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica selecionada sobre as motivações iniciais em se realizar dispersões de partículas sólidas em líquidos; as implicações da nanotecnologia sobre tais dispersões; os métodos atuais de preparação das dispersões com partículas nanométricas (nanofluidos); as propriedades superiores que tais dispersões têm apresentado, bem como as possíveis justificativas para a melhoria destas propriedades; e finalmente as aplicações que têm sido vislumbradas com nanofluidos.



No capítulo 3 é apresentada toda a metodologia utilizada na realização deste trabalho, desde a modelagem física do problema estudado até a metodologia numérica utilizada na simulação dos escoamentos no interior das cavidades fechadas. Também é descrita a metodologia utilizada na preparação das amostras de dispersões de nanopartículas de diamante e nanotubos de carbono em óleo, na medição das propriedades das amostras e na modelagem matemática.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e numéricos obtidos neste trabalho. No que tange à parte experimental, são apresentados os resultados das medições das propriedades das amostras, conforme metodologia utilizada no capítulo 3. Na parte de resultados numéricos são apresentados os processos de verificação e validação do código bidimensional desenvolvido, os campos de temperatura, linhas de corrente, perfis de velocidade e coeficientes de troca térmica das amostras, realizando uma análise comparativa entre as dispersões de nanopartículas e o óleo puro.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho proposto, bem como algumas considerações para dar continuidade à pesquisa no tema.

# **CAPÍTULO II**

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

De modo a contextualizar este trabalho dentro das pesquisas realizadas sobre nanofluidos, realizou-se uma pesquisa bibliográfica que teve por objetivo abranger os seguintes tópicos: motivação que levou ao surgimento dos nanofluidos; implicações da nanotecnologia no desenvolvimento dos nanofluidos; métodos de preparação; propriedades físicas; abordagem na análise do sistema e as diversas aplicações dos nanofluidos. Para tanto, cada tópico desta revisão bibliográfica foi baseado, quando possível, numa estruturação cronológica. Assim, neste capítulo é possível acompanhar a evolução das pesquisas sobre nanofluidos, desde procedimentos gerais até as aplicações de nanofluidos em transformadores elétricos, tópico referente a este trabalho.

### **2.1 Motivação na obtenção de dispersões**

Os diversos sistemas térmicos tem eficiência térmica fortemente relacionada à capacidade de troca de calor dos fluidos utilizados, que na maioria dos casos são fluidos líquidos. Porém, as propriedades térmicas dos líquidos quando comparadas com as dos sólidos são bastante inferiores, conforme pode ser visto na Fig. 2.1, onde os valores típicos de

condutividade térmica de sólidos e líquidos estão expressos em escala logarítmica.

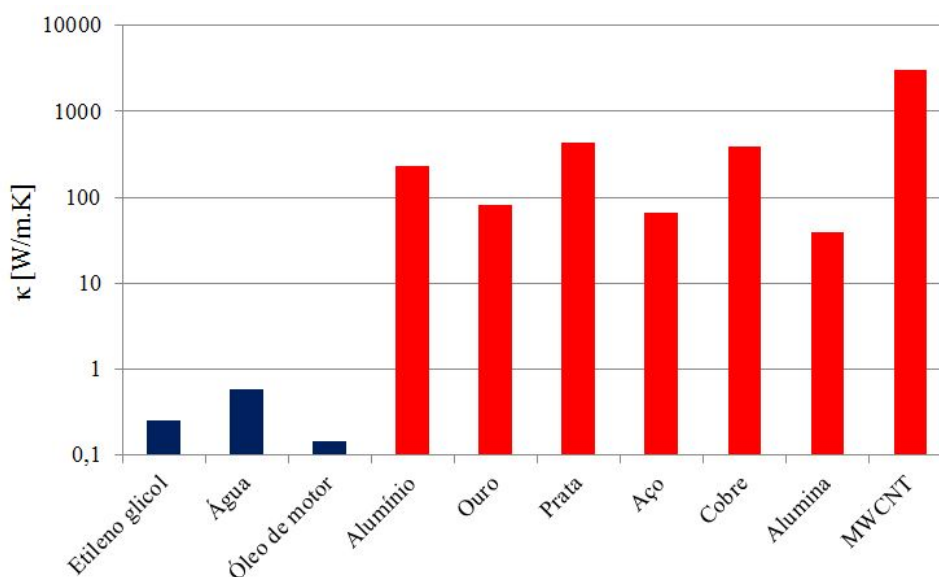


Figura 2.1 – Valores de condutividade térmica de alguns sólidos e líquidos à temperatura de 25 °C (dados obtidos no programa *Engineering Equation Solver-EES*).

Maxwell (1873), utilizando a teoria do meio efetivo, apresentou uma forma para estimar propriedades de dispersões, inclusive a condutividade térmica. A teoria do meio efetivo descreve as propriedades macroscópicas de compósitos, baseadas nas propriedades dos materiais que os compõem e nas respectivas frações do compósito. Sequencialmente aos estudos de Maxwell, diversas tentativas foram realizadas para obter dispersões de partículas sólidas em líquidos, pois acreditava-se que, baseado na teoria do meio efetivo, tais dispersões apresentariam propriedades térmicas superiores. Devido às limitações tecnológicas da época, estas dispersões eram realizadas com partículas milimétricas ou micrométricas. Porém, tais dispersões apresentavam muitos inconvenientes que impossibilitavam o uso das mesmas, tais como, sedimentação das partículas na tubulação, entupimento em canais de área transversal reduzida, elevada perda de carga e desgaste do sistema de bombeamento e tubulações (MURSHED; LEONG; YANG, 2008a). Devido a estes inconvenientes, a pesquisa sobre estas dispersões estagnou até o momento em que o desenvolvimento tecnológico possibilitou ao homem atuar de forma controlada sobre os materiais em escala nanométrica.

## 2.2 Implicações da nanotecnologia sobre as dispersões

A nanotecnologia recebeu os primeiros vislumbres na palestra de encerramento da Sociedade Americana de Físicos, proferida por Richard Feynman, no ano de 1959. Feynman (1959), que em 1965 recebeu o prêmio Nobel de Física por seus estudos sobre eletrodinâmica quântica, na palestra intitulada “*There’s Plenty of room at the bottom*” (em português, “Há muito espaço lá embaixo”), tratou sobre a possibilidade de manipular a matéria a nível atômico. Apesar de não mencionar o termo nano, esta palestra é considerada como o início da nanotecnologia. Passados 27 anos da palestra de Feynman, Gerd Binnig e Heinrich Rohrer projetaram o primeiro microscópio de tunelamento, que possibilitou a manipulação de átomos. Atualmente, a pesquisa na manipulação dos materiais na escala nanométrica e mesmo abaixo dela, chamada de nanotecnologia, tem crescido, sendo aplicada às diversas áreas do conhecimento. Em particular, a nanotecnologia tem sido aplicada para a melhoria das propriedades físicas de líquidos, como por exemplo, na melhoria das propriedades térmicas do líquido, por meio da dispersão de partículas de comprimento característico da ordem de nanômetros.

Os problemas inerentes às dispersões de partículas micrométricas e milimétricas em líquidos são significativamente reduzidos, quando são utilizadas partículas de tamanho característico da ordem de nanômetros. As dispersões de nanopartículas nos fluidos convencionais utilizados em sistemas térmicos, apresentam, tomando-se os devidos cuidados, características superiores em relação às obtidas com dispersões com partículas micrométricas e milimétricas: maior estabilidade, menores perda de carga, redução do desgaste e ocorrência nula de entupimentos, mesmo para escoamentos em micro canais. Além disso, devido às dimensões das partículas, estima-se que ocorram mecanismos que intensificam a condutividade térmica destas dispersões (KEBLINSKI et al., 2002), (WANG; XU; CHOI, 1999).

Uma das grandes vantagens que as dispersões de nanopartículas em líquidos têm sobre as dispersões que utilizavam partículas micro e milimétricas é a estabilidade, ou seja, a manutenção durante um longo período de tempo, que depende da aplicação, da dispersão

das partículas no líquido.

Analizando somente as forças peso e empuxo sobre uma partícula imersa em um líquido, pode-se de forma simplificada analisar a vantagem de uma dispersão de partículas nanométricas sobre uma dispersão de partículas micrométricas. Seja um sistema I, composto de uma partícula micrométrica imersa em um líquido e um sistema II, composto de uma partícula nanométrica imersa no mesmo líquido, onde o material das partículas micro e nano é o mesmo nos dois sistemas. Somando-se vetorialmente a força peso e a força empuxo que age sobre as partículas dos dois sistemas e dividindo a resultante da força que age sobre a partícula micrométrica pela força resultante que age sobre a partícula nanométrica, tem-se que a relação das forças resultantes é dada somente pela razão, elevada ao cubo, dos raios das partículas (considerando-se partículas esféricas). Tomando-se os raios das partículas micrométrica e nanométrica como, respectivamente  $1\ \mu\text{m}$  e  $1\ \text{nm}$ . Obtém-se que a força resultante (peso-empuxo) sobre uma partícula nanométrica é 1 bilionésimo da força resultante sobre uma partícula micrométrica. Porém, uma dispersão de partículas nanométricas em um líquido é um sistema muito mais complexo, onde forças de interação entre partícula e líquido, interação entre partícula e partícula, estão presentes também.

O processo de preparação ou síntese dos nanofluidos tem grande influência na estabilidade dos mesmos. Na sequência são abordados os métodos de preparação dos nanofluidos, bem como suas vantagens e desvantagens.

## **2.3 Preparação de nanofluidos**

A preparação, também chamada de síntese, dos nanofluidos tem um papel crucial em diversas características finais dos mesmos, tais como, estabilidade, homogeneidade e propriedades físicas. Portanto, o conhecimento dos métodos de preparação dos nanofluidos é importante para uma adequada escolha do método a ser utilizado para obter um determinado nanofluido.

Basicamente existem dois métodos de preparação de nanofluidos, a saber, o método de um passo e o método de dois passos. Além destes dois métodos, existem novos métodos que têm surgido com o objetivo de suprir as deficiências existentes nos métodos de um passo e de dois passos.

### 2.3.1 Método de um passo

O método de um passo consiste na obtenção dos nanofluidos simultaneamente à obtenção das nanopartículas. Esta característica do método de um passo reduz os efeitos de aglomeração das nanopartículas, e no caso de partículas metálicas reduz também a ocorrência de oxidação das mesmas, algo que é difícil de controlar no método de dois passos (CHAUPIS, 2011). No contexto do método de um passo, dois processos de obtenção de nanofluidos são comumente encontrados na literatura, os processos físicos e químicos. Independente do processo utilizado no método de preparação de um passo, a obtenção das nanopartículas ocorre no meio líquido, que concomitantemente, é o líquido de base do nanofluido.

Eastman et al. (2001) brevemente descrevem um processo físico do método de um passo, que consiste na condensação direta do vapor metálico em partículas nanométricas pelo contato com o escoamento de um líquido de baixa pressão de vapor, que é o próprio líquido de base do nanofluido. Tsung et al. (2003) desenvolveram um processo físico denominado de Sistema de Síntese de Nanopartículas por Arco Submerso, ASNSS (do inglês, *Arc Submerged Nanoparticles Synthesis System*), onde foi obtida uma dispersão de nanopartículas de cobre em água deionizada. A técnica consiste na utilização de uma barra de cobre imersa em um líquido dielétrico, neste caso água deionizada, que recebe uma corrente elétrica, formando um arco elétrico, tal que, eleva a temperatura da barra a uma temperatura na faixa de 6273 K a 12273 K. A vaporização do metal e da água dentro da câmara faz com que os volumes dos mesmos cresçam rapidamente. Assim, o metal vaporizado se move rapidamente, pela vaporização da água, da região de formação do arco elétrico para uma região onde a água se encontra na fase líquida, onde se solidifica sem crescimento demasiado das partículas, sendo

alcançadas partículas com dimensões nanométricas.

Os processos físicos do método de um passo apresentam limitações na produção de nanofluidos em larga escala e apresentam elevados custos (YU; XIE, 2012). Zhu, Lin e Yin (2004) apresentaram um processo químico de um passo para obtenção de nanofluidos composto de nanopartículas de cobre, pela redução de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  com  $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$  em etileno glicol, por meio da irradiação de micro ondas. Eles obtiveram uma dispersão homogênea e estável por mais de três semanas sem movimentação do fluido, e por mais de oito horas, sob condição de centrifugação a 4000 rpm (418,9 rad/s), sem sedimentação.

O método de um passo apresenta algumas desvantagens: dificuldade em obter dispersões livres de contaminantes, devido à incompleta reação ou estabilização, o que torna difícil isolar o efeito de mudança nas propriedades do líquido, referente à utilização das nanopartículas (YU; XIE, 2012) e; no caso de processo físico, o fluido deve apresentar baixa pressão de vaporização (CHAUPIS, 2011). Apesar de algumas destas dificuldades estarem sendo contornadas paulatinamente, atualmente o método de dois passos se mostra, de forma geral, mais vantajoso.

### 2.3.2 Método de dois passos

Neste método, a síntese de nanofluidos é realizada em duas etapas, produção das nanopartículas e mistura das nanopartículas com o líquido de base. O método de dois passos apresenta como principal vantagem o domínio na produção, em larga escala, de diversas nanopartículas sólidas, o que torna este método mais versátil na síntese de nanofluidos. Porém, neste método a estabilidade das dispersões é mais difícil de ser obtida, principalmente sem a utilização de agentes dispersantes (surfactantes), cuja utilização é normalmente evitada, pois estes agentes afetam as propriedades do sistema nanopartículas e líquido de base, impedindo que sejam realizadas de forma clara comparações entre as propriedades do líquido de base e o nanofluido obtido. O processo de fabricação, armazenamento e transporte das nanopartículas favorece à aglomeração das mesmas. Assim, o processo de dispersão deve realizar a quebra

dos aglomerados das nanopartículas, com o intuito de se obter dispersões homogêneas e também estáveis. As dificuldades encontradas na obtenção de dispersões homogêneas e estáveis têm sido contornadas, utilizando técnicas de dispersão com auxílio de mecanismos de agitação por força magnética, agitação ultrassônica, agitação com alta taxa de cisalhamento e homogeneização (YU; XIE, 2012).

Diversos pesquisadores têm utilizado o método de dois passos para obter nanofluidos. Pak e Cho (1998) utilizaram um processo mecânico para obter dispersões de alumina ( $Al_2O_3$ ) e dióxido de Titânio ( $TiO_2$ ) em água, com diâmetro das nanopartículas de 13 e 27 nm, respectivamente. Xuan e Li (2000) obtiveram dispersões de nanopartículas de cobre em óleo mineral e água, por meio de agitação mecânica, utilizando como agentes dispersantes ácido oleico e um tipo de sal. Yang et al. (2005) obtiveram nanofluidos de grafite em óleos utilizando um método de dois passos. Sajadi e Kazemi (2011) obtiveram dispersões de dióxido de titânio em água, com concentração de 0,05%-0,25% por meio de processo mecânico de mistura e posteriormente por processo de vibração ultrassônica

As nanopartículas podem ser obtidas por diversos métodos que podem ser agrupados em cinco categorias: redução de sal em metal de transição; métodos fotoquímicos e de termo decomposição; redução de ligantes e compostos organometálicos; síntese de vapor de metal e; síntese eletroquímica (BOTHÁ, 2007). Dentre os diversos métodos para obter as nanopartículas, podem-se destacar duas técnicas específicas: deposição química de vapor e condensação utilizando gás inerte. Na deposição química de vapor, um substrato é exposto a um ou mais precursores de voláteis, os quais reagem ou se decompõem sobre a superfície do substrato, produzindo o substrato desejado. Já na técnica de condensação de sólidos utilizando gás inerte, o material sólido é vaporizado numa câmara a baixa pressão e este vapor é condensado pela colisão das partículas com o escoamento de um gás inerte a uma pressão controlada (OLIVEIRA, 2012).

O segundo passo do método de dois passos, que consiste na mistura das nanopartículas com o líquido de base, é realizado por um mecanismo físico, que pode ser feito por meio de um banho ultrassônico, sonicação ou por meio da homogeneização a alta pressão.



O banho ultrassônico e a sonicação apresentam princípios de funcionamento semelhantes, onde a quebra das aglomerações é realizada por uma frequência de vibração transmitida ao nanofluido. A diferença entre os mecanismos consiste no meio de transmissão da frequência de vibração. No banho ultrassônico esta vibração é transmitida pela água, que não fica em contato com a mistura, enquanto que na sonicação a transmissão da vibração é realizada por um sonotrodo imerso na mistura (OLIVEIRA, 2012). Chandrasekar, Suresh e Bose (2010) utilizaram um banho ultrassônico gerando pulsos ultrassônicos de 100 W a  $36 \pm 3$  kHz, para obter nanofluidos de alumina ( $Al_2O_3$ ) em água, com concentração volumétrica de 0,1%.

O processo de homogeneização a alta pressão realiza a quebra das aglomerações, pela indução de altas taxas de cisalhamento no sistema previamente misturado. Os pistões pressurizam o líquido, forçando a passagem por estreitos canais, que conduzem o líquido a uma câmara comum, onde a velocidade do líquido é aumentada. O processo resulta em um sistema disperso e homogêneo (OLIVEIRA, 2012).

Foi obtido por Oliveira (2012), utilizando processo de homogeneização a alta pressão, dispersões de prata em água visualmente homogêneas e estáveis por mais de dois meses. Hoffmann (2014) obteve, pelo mesmo processo, dispersões de nanotubos de carbono em água, que não apresentaram sedimentação visível por período superior a seis meses.

Com base nos resultados destes dois autores mencionados, o processo de homogeneização a alta pressão tem-se mostrado promissor na síntese de nanofluidos de prata e nanotubos de carbono.

## **2.4 Propriedade dos nanofluidos**

A possibilidade de se obter propriedades físicas modificadas, pelo o anseio no aumento da eficiência dos líquidos em diversos sistemas, como sistemas de troca térmica, é o principal motivo no interesse das dispersões de nanopartículas em líquidos, nanofluidos.

Neste t3pico s3o abordadas as modifica33es nas seguintes propriedades f3sicas, levando-se em considera33o estudos experimentais e te3ricos: massa espec3fica, calor espec3fico, condutividade t3rmica, viscosidade e rigidez diel3trica.

#### 2.4.1 Massa espec3fica

A massa espec3fica de uma dispers3o pode ser obtida a partir da regra das mistura ou de forma mais adequada, a partir da conserva33o da massa. Seja  $m_{np}$ , a massa das nanopart3culas utilizadas na s3ntese de um nanofluido e  $m_{fb}$ , a massa do l3quido de base. Ent3o, a massa do nanofluido 3 dada pela Eq. (2.1).

$$m_{nf} = m_{fb} + m_{np} \quad (2.1)$$

Que pode ser reescrita pela Eq. (2.2),

$$\rho_{nf}V_{nf} = \rho_{fb}V_{fb} + \rho_{np}V_{np} \quad (2.2)$$

Utilizando a defini33o de concentra33o volum3trica,  $\phi \equiv V_{np}/V_{nf}$ , obt3m-se que a massa espec3fica de uma dispers3o 3 dada pela Eq. (2.3).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np} \quad (2.3)$$

Onde:  $\rho$  e  $V$  s3o, respectivamente, a massa espec3fica e o volume; e os sub3ndices,  $fb$ ,  $nf$ ,  $np$ , indicam respectivamente, fluido de base, nanofluido e nanopart3cula. Esta equa33o,

que tem uma base teórica bem estabelecida, foi comprovada experimentalmente por Pak e Cho (1998), e portanto, pode ser utilizada na avaliação da massa específica de dispersões de nanopartículas em líquidos.

#### 2.4.2 Calor específico

A propriedade que representa o calor necessário para elevar a temperatura de uma dispersão de nanopartículas em um líquido, pode ser obtida pela primeira lei da termodinâmica, conforme Eq. (2.4), considerando que as nanopartículas, devido ao tamanho característico, estão em equilíbrio térmico em qualquer instante.

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_{nf} &= \rho_{nf} \left[ \frac{Q}{m \Delta T} \right]_{nf} = \rho_{nf} \left[ \frac{Q_{np} + Q_{fb}}{m_{nf} \Delta T} \right] \\ &= \rho_{nf} \left[ \frac{(\rho c_p)_{np} V_{np} \Delta T + (\rho c_p)_{fb} V_{fb} \Delta T}{\rho_{nf} V_{nf} \Delta T} \right] = (1 - \phi)(\rho c_p)_{fb} + \phi(\rho c_p)_{np} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Na Eq. (2.5) o calor específico para uma dispersão de nanopartículas é apresentado de forma mais concisa.

$$c_{p_{nf}} = \frac{(1 - \phi)\rho_{fb}c_{p_{fb}} + \phi\rho_{np}c_{p_{np}}}{(1 - \phi)\rho_{fb} + \phi\rho_{np}} \quad (2.5)$$

Onde:  $c_p$  é o calor específico e  $Q$  é o calor absorvido pelo sistema.

Portanto, a Eq. (2.5), que tem sua aplicabilidade comprovada experimentalmente (BARBÉS et al., 2012), deve ser utilizada para estimar o calor específico de nanofluidos e não a regra da mistura, como foi utilizada erroneamente por alguns autores (PAK; CHO, 1998), (MAIGA, 2004).

### 2.4.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos é a propriedade física que mais tem chamado a atenção de diversos pesquisadores em todo o mundo. Desde a primeira publicação sobre condutividade térmica (e viscosidade) de dispersões de partículas nanométricas (neste artigo denominada de partículas ultrafinas), de Masuda et al. (1993), a pesquisa sobre a condutividade térmica em nanofluidos expandiu-se rapidamente. Nesta publicação foi relatado um incremento de cerca de 30% na condutividade térmica, utilizando uma concentração volumétrica de 4,3% de nanopartículas de alumina ( $Al_2O_3$ ) em água.

Dando seguimento à pesquisa das dispersões de nanopartículas em líquidos, Choi e Eastman (1995), que denominaram as dispersões de nanopartículas em líquidos como nanofluidos, apresentaram um estudo teórico dos benefícios no aumento da condutividade térmica da água pela dispersão de nanopartículas de cobre.

Lee, Choi e Eastman (1999) mediram a condutividade térmica de nanofluidos de  $Al_2O_3$  e  $CuO$  em água e etileno glicol. Os autores obtiveram que os incrementos na condutividade térmica utilizando as mesmas nanopartículas, em diferentes fluidos de base, foram diferentes. Suas medições da condutividade térmica dos nanofluidos de  $Al_2O_3$  foram bem correlacionadas com o modelo de Hamilton e Crosser (1962), que é uma modificação do modelo de Maxwell (1873), enquanto que as medições de condutividade térmica para nanofluidos de  $CuO$  não foram.

Wang, Xu e Choi (1999) mediram a condutividade térmica de dispersões de nanopartículas de  $Al_2O_3$  e  $CuO$ , com diâmetro médio respectivamente de 28 nm e 23 nm, em água, etileno glicol, fluido de bombeamento em vácuo e óleo de motor, como líquidos de base, obtendo em todos os casos aumento na condutividade térmica com a dispersão das nanopartículas. Eles obtiveram que o aumento relativo da condutividade térmica para as mesmas nanopartículas em diferentes líquidos de base foram diferentes, mostrando que o incremento na condutividade térmica dos nanofluidos depende da condutividade térmica dos líquidos de base. Eles compararam alguns modelos teóricos convencionais, utilizados

para estimar a condutividade térmica, como o de Maxwell (1873), com seus resultados experimentais. Nesta comparação, os modelos convencionais de condutividade térmica subestimaram os incrementos na condutividade térmica obtidos experimentalmente.

Ao contrário dos resultados obtidos pelos autores citados acima, Xie et al. (2002) mediram a condutividade térmica de nanofluidos de  $SiC$ , de partículas esféricas e cilíndricas, em água e etileno glicol, pelo método transiente do fio quente, e não obtiveram diferença no aumento relativo da condutividade térmica dos nanofluidos com as mesmas nanopartículas em diferentes fluidos de base (água e etileno glicol). Os resultados experimentais destes autores, para partículas cilíndricas, se correlacionaram muito bem com o modelo de Hamilton e Crosser (1962).

Assael et al. (2004) preparam nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla em água, com concentração volumétrica de 0,6%. Eles utilizaram na produção dos nanofluidos um tipo de agente dispersante e vibração ultrassônica, para tornar a mistura homogênea e estável. Os autores obtiveram um aumento máximo de 38% na condutividade térmica dos nanofluidos comparado ao líquido de base. Este aumento máximo foi obtido para nanofluidos com nanopartículas de maior razão de aspecto (comprimento/diâmetro). Os autores também relataram que, diversas concentrações volumétricas do dispersante utilizado não refletiram em mudanças no incremento da condutividade térmica em um mesmo nanofluido.

Hwang, Park e Jung (2006) mediram, por meio do método transiente do fio quente, nanofluidos de  $CuO$ ,  $SiO_2$  e nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT, do inglês *Multi-Wall Carbon Nanotubes*), preparados por um método de dois passos, usando vibração ultrassônica. Os autores obtiveram maior e menor incremento na condutividade térmica, respectivamente, nos nanofluidos de água-MWCNT e água- $SiO_2$ , comparado com os outros nanofluidos à base de água. Mostrando que o material da nanopartícula tem influência no incremento da condutividade térmica para um mesmo líquido de base. Além disso, comparando diferentes líquidos de base, para as mesmas nanopartículas dispersas, na mesma concentração volumétrica, eles observaram que líquidos de base com menor condutividade térmica apresentaram maior intensificação da condutividade térmica.

Murshed, Leong e Yang (2008b) mediram a condutividade térmica de nanofluidos de alumínio ( $Al$ ) em etileno glicol e óleo de motor; de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) e de alumina ( $Al_2O_3$ ) em etileno glicol e água. Eles obtiveram aumento na condutividade térmica com o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas, sendo que, para nanofluido de dióxido de titânio em etileno glicol o maior incremento foi de 18% para uma concentração volumétrica de 5%, enquanto que, para nanofluido de alumínio em etileno glicol à mesma concentração volumétrica, o incremento foi de 45%. Estes resultados mostraram que, partículas com condutividade térmica maiores, apresentam incrementos maiores na condutividade térmica dos nanofluidos de mesmo líquido de base, visto que, alumínio apresenta condutividade térmica maior que a do dióxido de titânio.

Devido às discrepâncias encontradas nos resultados experimentais da condutividade térmica, Buongiorno et al. (2009) realizaram um exercício internacional de referência das propriedades de nanofluidos, cujo objetivo era elucidar os incrementos na condutividade térmica dos nanofluidos, através da medição da condutividade térmica de diversos nanofluidos, a ser realizada por 34 diferentes instituições espalhadas pelo mundo, com diferentes técnicas de medição. No exercício foram obtidos 4 conjuntos de nanofluidos de 4 organizações, que forneceram diversas características dos nanofluidos. Os nanofluidos foram divididos para que as 34 instituições realizassem medidas de condutividade térmica dos mesmos, bem como de outras propriedades (nem todas as instituições mediram outras propriedades além da condutividade térmica). Na Tab. 2.1 são apresentadas as amostras de nanofluidos utilizadas neste exercício; a condutividade térmica relativa, obtida experimentalmente; e a condutividade térmica relativa, obtida pelo modelo de Nan et al. (1997), da teoria do meio efetivo.

Tabela 2.1: Resultados experimentais da condutividade térmica de vários nanofluidos - Buongiorno et al. (2009).

Conjunto	Amostra	$\kappa_r$ ( $\kappa_{nf}/\kappa_{fb}$ )	$\kappa$ modelo teórico Nan et al. (1997)	
			Limite inferior	Limite superior
I	$Al_2O_3$ - nanotubos (80x10 nm <sup>2</sup> ), $\phi = 1,0\%$ em água	$1,036 \pm 0,004$	1,024	1,086
	Água deionizada			
	$Al_2O_3$ - esféricas (10 nm), $\phi = 1,0\%$ em PAO e surfactante	$1,039 \pm 0,003$	1,027	1,030
	$Al_2O_3$ - esféricas (10 nm), $\phi = 3,0\%$ em PAO e surfactante	$1,121 \pm 0,004$	1,083	1,092
	$Al_2O_3$ - nanotubos (80x10 nm <sup>2</sup> ), $\phi = 1,0\%$ em PAO e surfactante	$1,051 \pm 0,003$	1,070	1,116
	$Al_2O_3$ - nanotubos (80x10 nm <sup>2</sup> ), $\phi = 3,0\%$ em PAO e surfactant	$1,176 \pm 0,005$	1,211	1,354
	PAO <sup>1</sup> e surfactante			

*Continua na página seguinte*

Conjunto	Amostra	$\kappa_r$ ( $\kappa_{nf}/\kappa_{fb}$ )	$\kappa$ modelo teórico Nan et al. (1997)	
			Limite inferior	Limite superior
II	Au - esféricas (10 nm), $\phi = 0,001\%$ em água e estabilizante	$1,007 \pm 0,003$	1,000	1,000
	Água e estabilizante			
III	$SiO_2$ - esféricas (22 nm), $\phi = 31,0\%$ em água e estabilizante	$1,204 \pm 0,010$	1,008	1,312
	Água deionizada			
IV	$Mn_{1/2} - Zn_{1/2} -$ $Fe_2O_4$ - esféricas (7 nm), $\phi = 0,17\%$ em água e estabilizante	$1,003 \pm 0,008$	1,000	1,004
	Água e estabilizante			

Conforme pode ser visto na Tab. 2.1, os resultados obtidos experimentalmente para estes nanofluidos não foram subestimados por um modelo da teoria do meio efetivo. Pode-se destacar dos resultados obtidos para a condutividade térmica que, em geral os nanofluidos apresentaram maior incremento na condutividade térmica com o aumento na concentração volumétrica, aumento na razão de aspecto das nanopartículas e na diminuição da condutividade térmica do líquido de base.

Chandrasekar, Suresh e Bose (2010) mediram experimentalmente a condutividade

<sup>1</sup>Poli-alfa Olefina, que é uma composição de um polímero em um hidrocarboneto



térmica de dispersões de nanopartículas de alumina com tamanho característico de 43 nm em água, com concentrações volumétricas variando de 0,33% a 3,0%, onde o incremento máximo da condutividade térmica foi de 9,7%. O incremento da condutividade térmica com a concentração volumétrica das nanopartículas apresentou comportamento linear.

Baby e Ramaprabhu (2010) mediram a condutividade térmica de nanofluidos de grafeno em água (concentração volumétrica de grafeno variando de 0,005% a 0,056%) e etileno glicol (concentração volumétrica de grafeno variando de 0,005% a 0,05%), que foram produzidos por meio de vibração ultrassônica. Os autores obtiveram que a condutividade térmica aumentou, não linearmente, com o aumento da concentração volumétrica e também com o aumento da temperatura da dispersão. Comparado à condutividade térmica da água, o nanofluido com concentração volumétrica de 0,056% de grafeno em água, teve um incremento de 14% e 64%, respectivamente para, temperaturas de 298,15 K (25 °C) e 323,15 K (50 °C). Já para os nanofluidos à base de etileno glicol, os autores não observaram incrementos tão significativos na condutividade térmica.

Yu et al. (2011) obtiveram nanofluidos de grafeno e de óxido de grafeno em etileno glicol, por um método de dois passos, sendo a dispersão realizada por um processo de vibração ultrassônica. Os autores mediram a condutividade térmica destes nanofluidos para uma larga faixa de temperatura e observaram pouca variação no incremento da condutividade térmica com a temperatura. Já o incremento da condutividade térmica destes nanofluidos com a concentração volumétrica, que variou de 1% a 5%, apresentou comportamento linear, sendo que, para os nanofluidos com nanopartículas de grafeno, o incremento máximo foi de 86% e para os nanofluidos com nanopartículas de óxido de grafeno, o incremento máximo foi de 61%. Os incrementos observados na condutividade térmica destes nanofluidos podem ser justificados pela forma das nanopartículas, que são bidimensionais com grande relação área/espessura, sendo que, para uma mesma concentração volumétrica estas nanopartículas tem maior área de contato com o meio líquido do que nanopartículas esféricas, por exemplo, fazendo com que a transferência térmica seja mais eficiente.

Barbés et al. (2012) mediram a condutividade térmica de dispersões de nanopartículas

de alumina ( $Al_2O_3$ ) em água e etileno glicol (EG), em uma faixa de temperatura de 298,15 K (25 °C) a 338,15 K (65 °C) e concentrações volumétricas de 1,0% a 9,3%. Os nanofluidos foram preparados por um método de dois passos, sendo que as nanopartículas e o líquido de base (água ou etileno glicol) foram misturados e submetidos à sonicação. Os autores obtiveram um aumento máximo de aproximadamente 30% e 17%, respectivamente, para  $Al_2O_3$ -EG com concentração volumétrica de 8,0% e  $Al_2O_3$ -água com concentração volumétrica de 9,3%.

Iranidokht et al. (2013) avaliaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Cu$  em etileno glicol e também nanofluidos compostos da mistura destes nanofluidos, com utilização de surfactante para mudança do pH. Os autores obtiveram que a utilização de surfactantes incrementou ainda mais a condutividade térmica, sendo que, para nanofluidos de alumina, cobre e dióxido de titânio em etileno glicol, os incrementos máximos foram de, respectivamente, 13%, 37% e 18%, ambos com concentração volumétrica de 2%. Já os nanofluidos compostos pela mistura dos nanofluidos primários, apesar de terem a condutividade térmica aumentada pelo efeito do surfactante, apresentaram incrementos intermediários aos dos nanofluidos primários.

Iranidokht et al. (2014) analisaram experimentalmente a condutividade térmica de dispersões de nanopartículas de cobre (diâmetro nominal entre 10 nm a 30 nm) em óleo, obtidas por um método de dois passos, em uma grande faixa de temperatura (303,15 K a 483,15 K). Para garantir a dispersão das nanopartículas, os autores utilizaram um agente dispersante no óleo. Esta mistura foi considerada como líquido de base, ou seja, o óleo com acréscimo do agente dispersante. Para uma temperatura de 393,15 K (120 °C), os autores obtiveram um aumento praticamente linear com a concentração volumétrica das nanopartículas, com incremento máximo na condutividade térmica de aproximadamente 15%. De fato, para temperaturas abaixo de 423,15 K (150 °C) o incremento na condutividade térmica dos nanofluidos com a concentração volumétrica mostrou-se praticamente linear, enquanto que, para maiores temperaturas, o incremento foi se tornando constante com a concentração. O maior incremento na condutividade térmica dos nanofluidos foi de 18% para temperatura de 303,15 K (30 °C) e concentração volumétrica de 0,02%.

Como se pode observar, existe uma grande diversidade de dados experimentais sobre condutividade térmica em nanofluidos, sendo que estes resultados experimentais são fortemente dependentes de diversos fatores, tais como, material da partícula e do líquido de base, temperatura da dispersão, método de preparação e forma das nanopartículas, não existindo até o presente momento uma teoria fechada que possa justificar tais incrementos.

Alguns mecanismos físicos foram analisados por Koblinski et al. (2002) com o objetivo de justificar tais incrementos, na busca de obter uma teoria que seja aplicável na avaliação da condutividade dos nanofluidos. Os mecanismos analisados pelos autores, que se supõe serem responsáveis pelo aumento na condutividade térmica dos nanofluidos são: movimento Browniano das partículas, natureza do calor, camada de líquido a nível molecular na interface sólido e líquido e formação de aglomerações de partículas (do inglês, *cluster*).

O movimento Browniano, assim denominado por ter sido evidenciado por Robert Brown (1773-1858), refere-se ao movimento aleatório das partículas imersas em um fluido, onde, tal movimento ocorre devido às interações moleculares do fluido com as partículas imersas no mesmo. Apesar de evidenciar o movimento aleatório das partículas, Brown não chegou a uma relação matemática para este movimento. Einstein explica de forma correta o fenômeno e apresenta relações matemáticas para descrever o movimento Browniano, que foi expresso por um fator difusivo constante do movimento das partículas (SALINAS, 2005), dado pela Eq. (2.6).

$$D = \frac{k_B T}{3\pi d \mu}, \quad (2.6)$$

onde,  $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  é a constante de Boltzmann,  $d$  é o diâmetro da partícula e  $\mu$  a viscosidade do fluido no qual as partículas estão imersas.

Utilizando a Eq. (2.6), pode-se estimar a escala de tempo para que uma partícula desloque a distância do tamanho da própria partícula, Eq. (2.7), e comparando com o tempo

necessário para que calor seja difundido na mesma distância, Eq. (2.8), pode-se avaliar o efeito do movimento Browniano no incremento da condutividade térmica.

$$\tau_d = \frac{d^2}{6D} = \frac{3\pi\mu d^3}{6k_B T} \quad (2.7)$$

$$\tau_c = \frac{d^2}{6\alpha} = \frac{\rho c_p d^2}{6\kappa_{fb}} \quad (2.8)$$

Fazendo-se um estudo de caso, onde o fluido seja água,  $\mu=0,001$  Pa.s,  $\rho=998$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_p=4183$  J/kg.K,  $\kappa_{fb}=0,59$  W/m.K, para uma temperatura de 293,15 K e para uma partícula esférica de diâmetro de 1 nm, obtém-se que a relação entre o tempo de deslocamento de uma partícula devido ao movimento Browniano e o tempo de difusão do calor na mesma distância é de aproximadamente 300, ou seja, a escala de tempo da difusão de calor é, mesmo para uma escala nanométrica, cerca de 300 vezes menor. Portanto, o movimento Browniano, por si só, não pode ser considerado como um mecanismo que justifique os incrementos na condutividade térmica obtidos experimentalmente.

A natureza do calor na escala nanométrica é outro mecanismo que pode justificar os elevados incrementos na condutividade térmica dos nanofluidos. A condução do calor em escala macroscópica é considerada como difusiva, sendo representada pela Eq. (2.9). A energia interna em sólidos cristalinos é transportada por fônons, que representa um quantum de vibração na rede cristalina. Estes fônons se propagam em direções aleatórias e são espalhados uns pelos outros e pelos defeitos na rede cristalina, e assim justificam a representação da transferência de energia térmica por difusão. Em metais, o transporte de energia térmica se dá principalmente por meio dos elétrons, que apresenta movimento difusivo na escala microscópica (KEBLINSKI et al., 2002).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.9)$$

Para que calor flua por meio dos fônons de modo difusivo, o material deve ser de dimensão maior que o livre caminho médio molecular de um fônons. Para uma nanopartícula de  $Al_2O_3$ , o livre caminho médio de um fônons pode ser estimado em 35 nm. Assim, para uma nanopartícula de alumina de dimensão menor que 35 nm, fônons não são transportados por difusão, mas por transporte balístico, e portanto, as teorias para avaliação da condutividade térmica de nanofluidos pela equação de difusão do calor não se aplicam. Porém, tanto para fônons balístico ou difusivo, a temperatura na partícula é essencialmente considerada constante e portanto, as condições de contorno para o fluxo de calor no fluido de baixa condutividade térmica são as mesmas. Mas, outro efeito decorrente do fônons balístico pode ocorrer, de modo que possa levar ao aumento na condutividade térmica dos nanofluidos. O livre caminho médio de um fônons em um líquido é muito menor que o livre caminho médio de um fônons na partícula dispersa. Assim, um fônons que se inicia em uma partícula, fica retido no líquido e alcança a próxima partícula balisticamente, elevando a eficiência no transporte térmico (KEBLINSKI et al., 2002).

Um terceiro mecanismo, que pode justificar os elevados aumentos na condutividade térmica dos nanofluidos, é a formação de uma camada líquida de dimensões moleculares na interface sólido e líquido. Espera-se que uma camada de líquido na proximidade da superfície da partícula tenha uma maior organização molecular que o líquido distante da interface sólido e líquido, apresentando propriedade térmica intermediária (à do sólido e à do líquido), e desta forma a condutividade térmica da mistura seja elevada. No limite superior, a espessura da camada de líquido, também denominada nanocamada, elevaria virtualmente a concentração volumétrica da nanopartícula aumentando assim, a condutividade térmica da dispersão. Porém, tem sido mostrado que a espessura da nanocamada é da ordem de 1 nm, e portanto, este mecanismo somente, não pode ser representativo no aumento anormal da condutividade

térmica de nanofluidos (KEBLINSKI et al., 2002).

Um último mecanismo que pode influenciar na condutividade térmica de nanofluidos é a formação de aglomerações de nanopartículas no fluido de base. Tais aglomerações (ou do inglês, *clusters*) criariam caminhos preferenciais para o calor, caminhos estes de alta condutividade térmica. No interior do agregado de partículas, calor pode mover-se muito mais rapidamente, onde a fração volumétrica é muito maior que a fração volumétrica do nanofluido, este fato aumentaria a condutividade térmica (KEBLINSKI et al., 2002).

Expressões têm sido derivadas, utilizando os parâmetros que representam os mecanismos físicos descritos acima. Porém por não serem expressões que representem a realidade física do incremento da condutividade térmica em nanofluidos e por não se tratar do enfoque principal deste trabalho, estas não serão apresentadas neste texto. Referências sobre estas expressões mais recentes podem ser encontradas (CHAUPIS, 2011; OLIVEIRA, 2012).

Outras expressões, baseadas somente na teoria do meio efetivo, que não levam em conta os mecanismos acima apresentados, têm sido utilizadas para estimar a condutividade térmica de uma dispersão de nanopartículas em um líquido, sendo que, algumas destas são apresentadas na sequência, por sua relevância histórica na estimativa da condutividade térmica das dispersões. Devido ao fato da teoria para avaliação da condutividade térmica de nanofluidos não ser um assunto concluído, todas as expressões utilizadas para estimar condutividade térmica de nanofluidos serão referenciadas como condutividade térmica estimada, ao invés de simplesmente, condutividade térmica do nanofluido.

No trabalho de Maxwell sobre eletricidade e magnetismo de 1873, é apresentada uma expressão, pela solução de uma equação de Laplace, para a resistência elétrica de uma dispersão de partículas esféricas em um meio dispersante, onde a distribuição das partículas neste meio dispersante é tal que, não ocorram efeitos na propriedade da mistura devido às interações entre as partículas. Usando o resultado obtido por (MAXWELL, 1873) para o inverso da resistência elétrica, observando que a formulação matemática é idêntica, é possível chegar na seguinte relação para a condutividade térmica de uma dispersão, para partículas esféricas a baixas concentrações volumétricas (para que não haja efeitos da interação das partículas

sobre a condutividade térmica), Eq. (2.10). Esta equação foi escrita na nomenclatura para nanofluidos, reconhecendo porém, que a condutividade térmica não pode ser dita como a de nanofluidos.

$$\kappa_{est} = \kappa_{fb} \frac{2\kappa_{fb} + \kappa_{np} + 2\phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})}{2\kappa_{fb} + \kappa_{np} - \phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})} \quad (2.10)$$

Após o trabalho de Maxwell, outros autores obtiveram relações baseadas também na teoria do meio efetivo, levando em conta outros fatores, como por exemplo, forma da partícula, distribuição das partículas e resistência interfacial, conhecida também como resistência Kapitza.

Hamilton e Crosser (1962) desenvolveram uma expressão, Eq. (2.11) baseada na expressão de Maxwell (1873), onde é levado em consideração um fator de forma da partícula dispersa no meio. O fator de forma,  $n$ , é dado por  $n = 3/\psi$  e  $\psi$  é a esfericidade, definida como sendo a razão entre a área superficial de uma esfera, de mesmo volume da partícula, e a área superficial da partícula.

$$\kappa_{est} = \kappa_{fb} \frac{(n-1)\kappa_{fb} + \kappa_{np} + (n-1)\phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})}{(n-1)\kappa_{fb} + \kappa_{np} - \phi(\kappa_{np} - \kappa_{fb})} \quad (2.11)$$

Pode-se observar que para uma esfericidade unitária, a expressão de Hamilton e Crosser (1962) é idêntica à de Maxwell (1873).

Outra expressão, Eq. (2.12), desenvolvida por Nan et al. (1997), baseada também na teoria do meio efetivo e que apresentou boa concordância com os resultados experimentais de Buongiorno et al. (2009), leva em conta além da forma da nanopartícula, a resistência térmica interfacial ou resistência Kapitza,  $R_K$ . Para esta expressão, os parâmetros geométricos utilizados da nanopartícula podem ser vistos na Fig. 2.2.

$$\kappa_{est} = \kappa_{fb} \frac{3 + \phi [2\beta_{11} (1 - L_{11}) + \beta_{33} (1 - L_{33})]}{3 - \phi [2\beta_{11} L_{11} + \beta_{33} L_{33}]}, \quad (2.12)$$

onde, os fatores da Eq. (2.12), Eq. (2.13) a Eq. (2.20), são dados em função da razão entre os diâmetros de uma partícula elipsoidal,  $p$ :

$$p = a_{11}/a_{33} \quad (2.13)$$

$$L_{11} = L_{22} = \begin{cases} \frac{p^2}{2(p^2 - 1)} - \frac{p}{2(p^2 - 1)^{3/2}} \cosh^{-1} p \rightarrow p > 1 \\ \frac{p^2}{2(p^2 - 1)} + \frac{p}{2(1 - p^2)^{3/2}} \cos^{-1} p \rightarrow p < 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$L_{33} = 1 - 2L_{11} \quad (2.15)$$

$$\beta_{ii} = \frac{\kappa_{ii}^c - \kappa_{fb}}{\kappa_{fb} + L_{ii}(\kappa_{ii}^c - \kappa_{fb})} \quad (2.16)$$

$$\kappa_{ii}^c = \frac{\kappa_{np}}{1 + \gamma L_{ii} \kappa_{np} / \kappa_{fb}} \quad (2.17)$$



$$\gamma = \begin{cases} (2 + 1/p)\alpha \rightarrow p \geq 1 \\ (1 + 2p)\alpha \rightarrow p \leq 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \begin{cases} a_k/a_1 \rightarrow p \geq 1 \\ a_k/a_3 \rightarrow p \leq 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\alpha_k = R_K \kappa_{fb} \quad (2.20)$$

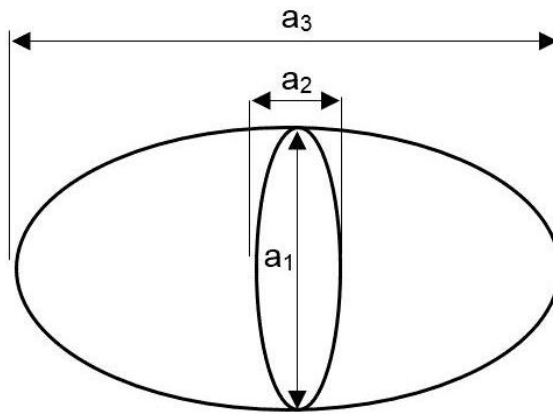


Figura 2.2 – Características geométricas de uma nanopartícula na forma de elipsoide.

A comparação entre as expressões de Maxwell (1873), Hamilton e Crosser (1962) e Nan et al. (1997), baseadas na teoria do meio efetivo, para estimar a condutividade térmica de nanofluidos, pode ser vista na Fig. 2.3. Utilizou-se como condutividade térmica do fluido de base, a da água (0,59 W/m.K) e como condutividade térmica da nanopartícula a da alumina (40 W/m.K), onde se considerou uma nanopartícula na forma cilíndrica para a expressão de

Hamilton e Crosser (1962) e elipsoide para a expressão de Nan et al. (1997), sendo que, os comprimentos maior e menor da nanopartícula elipsoidal, foram os mesmos utilizados como comprimento e diâmetro da nanopartícula cilíndrica, respectivamente 10 nm e 30 nm. Nesta comparação não foi considerada resistência térmica interfacial.

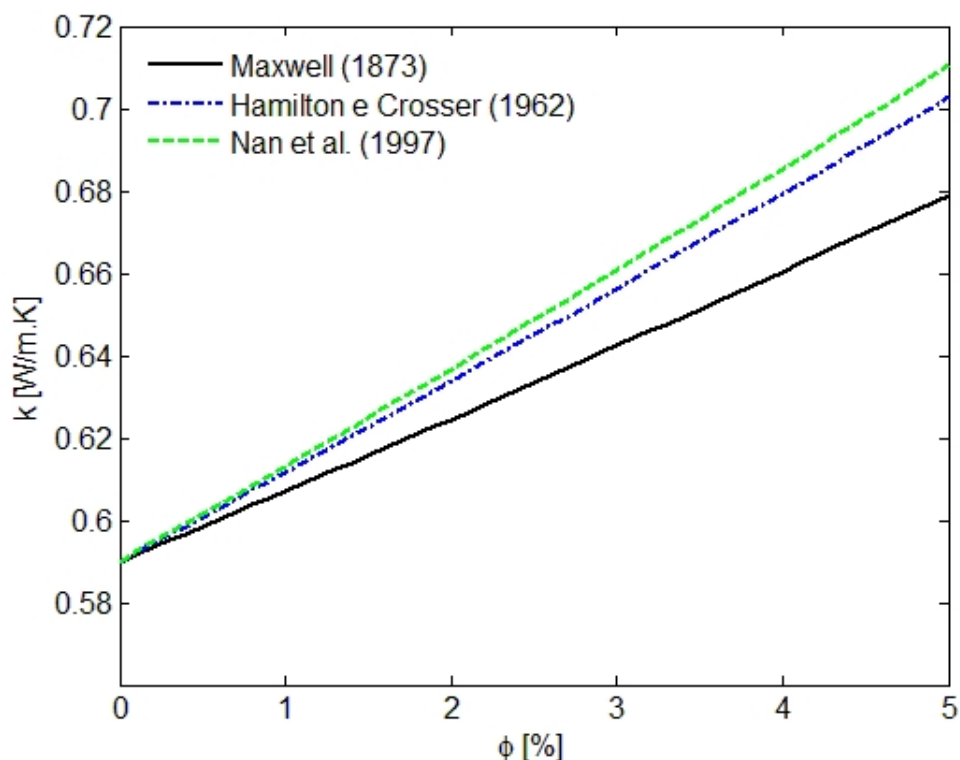


Figura 2.3 – Expressões baseadas na teoria do meio efetivo para avaliação da condutividade térmica de nanofluidos.

O entendimento dos mecanismos que regem o aumento na condutividade térmica dos nanofluidos é muito importante, pois a partir deste entendimento, uma avaliação teórica adequada da condutividade térmica dos nanofluidos se torna possível. Devido à não compreensão completa destes mecanismos, não existem atualmente expressões que possam ser utilizadas de modo confiável para estimar as propriedades de nanofluidos. Fato que também é verdadeiro para a viscosidade de nanofluidos, conforme apresentado na sequência.

#### 2.4.4 Viscosidade

A viscosidade dinâmica, que neste texto é recorrida simplesmente por viscosidade, é a propriedade que relaciona a tensão cisalhante aplicada no fluido com a taxa de deformação resultante no mesmo (WHITE, 2006). Fisicamente, esta propriedade expressa a facilidade que um determinado fluido tem em escoar, quando uma tensão é aplicada sobre o mesmo. Matematicamente, a viscosidade é definida para um escoamento unidimensional, considerando um sistema de coordenadas x-y, Eq. (2.21).

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.21)$$

Quando a taxa de deformação e a tensão cisalhante aplicada a um fluido apresentam relação linear, a viscosidade pode ser dita como sendo uma propriedade termodinâmica, ou seja, dependente somente do seu estado termodinâmico. Os fluidos que apresentam relação linear entre a taxa de deformação e a tensão cisalhante são chamados de fluidos newtonianos, dado que Newton encontrou esta relação em um fluido. Porém, quando a relação entre a taxa de deformação e tensão cisalhante não é linear, o fluido é dito como não newtoniano e a viscosidade é uma propriedade reológica, ou seja, depende da condição de operação do fluido e não somente do estado termodinâmico. Neste caso, o fluido pode ser pseudoplástico (até mesmo plástico), ou dilatante (WHITE, 2006). Em um fluido pseudoplástico, o aumento da taxa de deformação no fluido diminui a viscosidade local. Este fenômeno é referenciado como *shear-thinning* na literatura inglesa associada. Já em um fluido dilatante, o aumento da taxa de deformação no fluido, aumenta a viscosidade local. Tal fenômeno é referenciado como *shear-thickening* na literatura inglesa associada. O comportamento dos fluidos não newtonianos e newtonianos pode ser visto na Fig. 2.4.

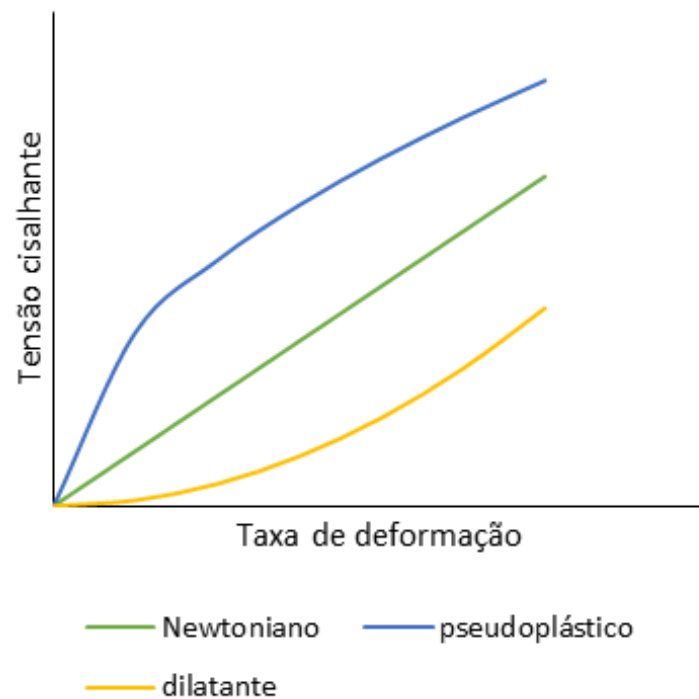


Figura 2.4 – Tipos de comportamento de fluidos.

O interesse da comunidade científica na viscosidade de nanofluidos inicialmente não foi tão grande quanto o que houve pela condutividade térmica, apesar de sua suma importância na avaliação da perda de carga dos escoamentos em sistemas de troca de calor. Ainda assim, muitas pesquisas podem ser encontradas sobre a viscosidade de nanofluidos, como pode ser visto na Tab. 2.2, que apresenta resultados relevantes de alguns autores sobre a influência de algumas variáveis na viscosidade dos nanofluidos. A indicação P significa uma influência positiva, ou seja, o aumento da variável analisada aumenta a viscosidade do nanofluido, enquanto que a indicação N significa uma influência negativa, ou seja, o aumento na variável analisada diminui a viscosidade do nanofluido. As indicações NA e ND estão referenciadas na parte inferior da Tab. 2.2.

Tabela 2.2: Influência da concentração e temperatura sobre a viscosidade.

Autores (ano)	Fluido base-nanopartícula	Influência sobre a viscosidade		Comportamento
		$\Delta\mu/\Delta\phi$	$\Delta\mu/\Delta T$	
Masuda et al. (1993)	Água- $SiO_2$ , água- $Al_2O_3$ e água- $TiO$	P	N	NA
Prasher et al. (2006)	Propileno glicol- $Al_2O_3$ e água- $TiO$	P	ND	Newtoniano
Nguyen et al. (2007)	Água- $Al_2O_3$ e água- $CuO$	P	N	NA
Namburu et al. (2007)	Mistura de etileno glicol e água- $CuO$	P	N	Newtoniano
Li, Zhu e Wang (2009)	Água- $Cu$	ND	N	NA
Duangthongsuk e Wongwises (2009)	Água- $TiO_2$	P	N	NA
Kole e Dey (2010)	Mistura de propileno glicol e água- $Al_2O_3$	P	N	Não newtoniano
Chandrasekar, Suresh e Bose (2010)	Água- $Al_2O_3$	P	NA	Newtoniano
Lee et al. (2011)	Água deionizada- $SiC$	P	N	NA

Continua na página seguinte

Autores (ano)	Fluido base-nanopartícula	Influência sobre a viscosidade		Comportamento
		$\Delta\mu/\Delta\phi$	$\Delta\mu/\Delta T$	
Aladag et al. (2012)	Água- $Al_2O_3$ e água-CNT	NA	N	Não newtoniano
Bobbo et al. (2012)	Água- $TiO_2$ e água-SWCNH	P	N	Newtoniano
Esfe e Saedodin (2014)	Etileno glicol- $ZnO$	P	ND	Newtoniano

P-Positiva; N-Negativa; NA-Não Analisada; ND-Não Detectada.

Com base nos resultados apresentados na Tab. 2.2, pode-se dizer que de modo geral nanofluidos têm apresentado comportamento newtoniano, sendo que, com o aumento da concentração volumétrica, a viscosidade aumenta, e com o aumento da temperatura a viscosidade diminui. Outros fatores porém influenciam nos valores de viscosidade dos nanofluidos, tais como, a forma e tamanho das nanopartículas e a utilização de agentes dispersantes. Assim, diferentes autores têm obtido resultados divergentes na tendência e valores de viscosidade para nanofluidos com mesmo fluido de base, mesma nanopartícula e mesma concentração volumétrica. Tais diferenças estão relacionadas com o fato destes nanofluidos terem sido preparados por diferentes processos, com nanopartículas com características geométricas diferentes, dentre outros fatores, que não são controlados e avaliados.

Com o objetivo de trazer maior elucidação nos resultados sobre viscosidade de nanofluidos, uma pesquisa experimental de bastante relevância foi realizada por Venerus et al. (2010) sobre a viscosidade de diversos nanofluidos. Os dados experimentais foram obtidos a partir de um exercício internacional de referência das propriedades de nanofluidos (INPBE,

do inglês, *International Nanofluid Property Benchmark Exercise*), já mencionado previamente. Os detalhes das amostras utilizadas para medir a viscosidade, podem ser vistos na Tab. 2.1. Neste exercício foram utilizados viscosímetros de duas categorias, sendo que em uma, a taxa de deformação não é conhecida e a tensão sobre as amostras não é homogênea, e em outra categoria, os viscosímetros são capazes de impor uma deformação controlada e praticamente uniforme nas amostras, como os viscosímetros tipo cone-placa. Os resultados apresentaram boa concordância entre as diversas instituições que realizaram as medições, com erros em torno de 20%, que podem ser justificados, em parte, na diferença da temperatura ambiente no qual a viscosidade dos nanofluidos foi medida. Os autores obtiveram que, para as sete amostras de nanofluidos analisadas, somente duas, a saber, uma dispersão com nanopartículas não esféricas de  $Al_2O_3$  em óleo, com concentração volumétrica de 1% e uma dispersão de  $SiO_2$  em água, com concentração volumétrica de 32%, não apresentaram comportamento newtoniano (com comportamento pseudoplástico, numa faixa de taxa de deformação). Os autores também obtiveram que a viscosidade relativa dos nanofluidos apresentou comportamento linear com a concentração volumétrica, com valores de viscosidade acima dos estimados por expressões clássicas, desenvolvidas para estimar a viscosidade de dispersões.

Pode-se destacar também o trabalho de Hoffmann (2014), que analisou o comportamento termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono em água escoando em um tubo reto, com condições de calor na parede do tubo. Para tanto, ele obteve experimentalmente a viscosidade dos nanofluidos com diferentes concentrações volumétricas, com nanopartículas de diferentes razões de aspecto e para diferentes temperaturas, utilizando um viscosímetro tipo cone-placa, onde a influência destes parâmetros na viscosidade dos nanofluidos foi analisada. Hoffmann (2014) obteve diminuição da viscosidade dos nanofluidos com o aumento da temperatura, e aumento da viscosidade com aumento da concentração volumétrica. Porém, a relação da viscosidade com as razões de aspecto das nanopartículas, mostrou-se inesperada, visto que as nanopartículas de maior razão de aspecto apresentaram menor aumento na viscosidade, enquanto que, as nanopartículas de menor razão de aspecto apresentaram maior aumento na viscosidade dos nanofluidos. Isso pode estar relacionado ao

fato da razão de aspecto das nanopartículas, depois da preparação dos nanofluidos, não terem se mantido a mesma, em decorrência do processo de preparação dos nanofluidos, que foi por homogeneização a altas pressões. Este processo de homogeneização pode ter quebrado as nanopartículas e modificado a razão de aspecto das mesmas, sendo que, uma análise das características geométricas das nanopartículas, após processo de homogeneização, deveria ter sido realizada para computar a influência deste parâmetro na viscosidade.

Os resultados experimentais para as viscosidade de nanofluidos não são adequadamente estimados por expressões clássicas desenvolvidas para estimar viscosidade de dispersões. Mas, atualmente não existe uma teoria que possa ser utilizada para estimar, de modo geral e acurado, a viscosidade deste tipo de dispersão. Ainda assim, o estudo das expressões ditas clássicas é importante, pois estas são a base para o desenvolvimento de uma teoria bem estabelecida para os nanofluidos.

A avaliação da viscosidade de dispersões de partículas em líquidos já tem sido estudada há muito tempo. Einstein, desenvolveu em 1906, uma expressão para estimar a viscosidade de dispersões de partículas esféricas, baseada nas equações de mecânica dos fluidos, considerando que a perturbação no padrão do escoamento, causada por uma partícula, não se sobrepõem à perturbação que uma segunda partícula causa ao escoamento (YU et al., 2007), Eq. (2.22). Na Eq. (2.22),  $\mu_{est}$  é considerada como viscosidade estimada para o nanofluido, e não a viscosidade do nanofluido, visto que, esta expressão não representa de forma adequada os valores obtidos experimentalmente.

$$\mu_{est} = \mu_{fb} (1 + 2,5\phi) \quad (2.22)$$

A partir da teoria desenvolvida por Einstein (1906), outros pesquisadores desenvolveram expressões para estimar a viscosidade de dispersões, estendendo a aplicação desta teoria para os seguintes casos: concentrações mais elevadas, levando-se em consideração a interação entre diferentes partículas; viscosidade “infinita” para concentração volumétrica de 100%;



e dispersões com partículas não esféricas. Na Tab. 2.3 podem ser vistas algumas destas expressões (anteriores à concepção dos nanofluidos) desenvolvidas para a extensão de alguns dos casos acima mencionados.

Tabela 2.3: Algumas expressões clássicas para estimar viscosidade de dispersões.

Autor (ano)	Expressão	Extensão da equação de Einstein (1906)
Simha (1940)	$\mu_{est} = \mu_{fb} \left\{ 1 + \frac{1}{15} \left[ 14 + \frac{(a/c)^2}{\ln(2a/c) - 1,5} + \frac{3(a/c)^2}{\ln(2a/c) - 0,5} \right] \phi \right\}$	Esferóide prolato $a \gg b = c$
Brinkman (1952)	$\mu_{est} = \mu_{fb} \frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}}$	Partículas esféricas, $\phi$ mais elevado
Batchelor (1977)	$\mu_{est} = \mu_{fb} (1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2)$	Partículas esféricas, $\phi$ mais elevado

Apesar de estarem sendo desenvolvidas expressões específicas para nanofluidos, muitas delas baseadas em ajustes de curvas de dados experimentais, ainda não existe uma teoria fechada sobre o assunto.

#### 2.4.5 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica de um fluido é dada pelo máximo campo elétrico aplicado em uma determinada espessura deste fluido sem que ocorra a formação de arco elétrico. A tensão em que ocorre a formação de arco elétrico é chamada de tensão de ruptura. Assim, a rigidez dielétrica indica a capacidade isolante do material pela aplicação de tensão elétrica em uma dada espessura do material.

A importância desta propriedade pode ser vista em óleos de transformadores elétricos, responsáveis pelo isolamento do conjunto núcleo e bobinas e também pela troca térmica no interior dos transformadores.

Com o objetivo de elevar a capacidade de isolamento de alguns fluidos, dispersões de nanopartículas têm sido realizadas nos mesmos. Estas nanopartículas apresentam propriedades específicas, de modo a elevar esta capacidade de isolamento. No caso especial de óleos de transformadores elétricos, o interesse na dispersão de nanopartículas nos óleos é no aumento da capacidade de troca térmica e da capacidade de isolamento dos mesmos, ou que esta apresente poucas modificações comparada à capacidade de isolamento do óleo puro. Satisfatoriamente, alguns autores têm obtido aumento na condutividade térmica e também na rigidez dielétrica com dispersões adequadas de nanopartículas nos óleos de transformadores elétricos.

Chiesa e Das (2009) estimaram a rigidez dielétrica de nanofluidos de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $SiC$  e  $Fe_2O_3$  em óleo de transformador elétrico, com concentrações volumétricas de até 1%. Os resultados mostraram que, a adição de nanopartículas de  $SiC$  deteriorou a rigidez dielétrica do óleo de transformador elétrico. Já os nanofluidos compostos de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ , a baixas concentrações volumétricas, apresentaram redução na rigidez dielétrica do óleo de transformador com surfactante, porém, a altas concentrações volumétricas, a rigidez dielétrica foi recuperada ao mesmo valor da rigidez dielétrica da mistura óleo de transformador e surfactante. Finalmente, utilizando nanopartículas de  $Fe_2O_3$ , a rigidez dielétrica aumentou em relação à do óleo de transformador elétrico puro, para todas as concentrações volumétricas.

Du et al. (2012) mediram a tensão de ruptura de óleo mineral para transformador

elétrico e de uma dispersão de nanopartículas de  $TiO_2$  (diâmetro médio menor que 20 nm) com concentração volumétrica de 0,075% em óleo mineral. Os autores obtiveram que a tensão de ruptura do nanofluido foi de até 20% maior que a tensão de ruptura do óleo mineral.

Lee e Kim (2012) estimaram a rigidez dielétrica de nanofluidos de partículas ferromagnéticas (que podem ser compostas de ferrita e magnetita) em óleo mineral para transformador elétrico. Eles obtiveram que a rigidez dielétrica, utilizando estas nanopartículas, aumentou cerca de 300% comparada à do óleo mineral puro.

Alguns dos resultados mencionados acima, têm despertado o interesse da comunidade científica sobre a aplicação de nanofluidos como fluidos de transferência de calor e como fluidos isolantes elétricos para transformadores elétricos. Porém, muita pesquisa sobre os efeitos da utilização de nanopartículas no óleo de transformador elétrico deve ser realizada, principalmente em termos da influência do campo eletromagnético sobre tais nanopartículas.

Com relação aos mecanismos que regem o transporte convectivo em nanofluidos, algumas teorias têm sido formuladas, mostrando um relativo avanço na pesquisa sobre convecção em relação à pesquisa sobre efeitos eletromagnéticos nos nanofluidos. Na sequência são apresentados algumas considerações sobre os mecanismos que podem reger o transporte convectivo em nanofluidos.

## **2.5 Transporte convectivo em nanofluidos**

Uma dispersão coloidal, composta de nanopartículas em um meio líquido, denominada de nanofluidos, pode ser considerada um sistema bifásico ou um sistema monofásico.

A consideração de um sistema monofásico em um escoamento, remete-se ao fato das nanopartículas apresentarem inércia desprezível, ou seja, não existe deslizamento entre as nanopartículas e o líquido circundante. Dentro desta abordagem, as equações do balanço de quantidade de movimento, do balanço de massa e da energia, podem ser aplicadas diretamente a escoamentos de nanofluidos, considerando-se apenas a modificação das propriedades dos

mesmos.

Já a consideração de um sistema bifásico em um escoamento, pressupõe o fato de haver velocidade relativa entre as nanopartículas e o fluido de base, sendo que esta velocidade relativa é tratada como uma perturbação na equação da energia, que tende a aumentar o transporte de energia no escoamento. Além disso, interações entre fluido-partícula, partícula-partícula, vice-versa, devem ser consideradas ao se analisar o escoamento de nanofluidos como um sistema bifásico.

Buongiorno (2006) estudou sete mecanismos que podem levar a uma diferença de velocidade entre as nanopartículas e o fluido de base, a saber: inércia, difusão Browniana, termoforese, difusoforese, efeito Magnus, drenagem de líquido e gravidade. Para tanto, o autor considerou a hipótese do contínuo para o líquido que circunda a nanopartícula. Ele avaliou o número de Knudsen, definido como a relação entre o livre caminho médio molecular do meio e a dimensão do corpo imerso. Para um nanofluido à base de água, o número de Knudsen é menor que 0,3, que o autor considerou como sendo, por ser menor que a unidade, aceitável para a utilização da hipótese do contínuo para o líquido. Dos sete mecanismos estudados, somente dois mecanismos foram considerados relevantes em nanofluidos: difusão Browniana e termoforese. Porém, estes mecanismos só são relevantes na ausência de estruturas turbilhonares.

Assim, ainda que tais considerações possam ser relevantes, devido à complexidade no tratamento do escoamento de nanofluidos como um sistema bifásico, a abordagem de análise adotada no presente trabalho para o escoamento de nanofluidos é de um sistema monofásico, onde as propriedades termo-físicas foram modificadas pela dispersão de nanopartículas.

## **2.6 Aplicações com nanofluidos**

As aplicações com nanofluidos não se restringem a sistemas térmicos mas também abrangem outras áreas. Um exemplo desta diversidade de aplicação de nanofluidos, é

a utilização dos mesmos no tratamento de câncer, onde drogas específicas poderiam ser transportadas, utilizando-se nanopartículas magnéticas, que se moveriam até o local desejado através da corrente sanguínea, pela influência de um campo magnético externo.

Contudo, a pesquisa sobre nanofluidos é maior na área térmica, onde diversas pesquisas têm sido realizadas na utilização de nanofluidos como fluidos de troca térmica nos mais variados sistemas, tais como: escoamento em tubo (PAK; CHO, 1998; HOFFMANN, 2014); radiadores automotivos (LEONG et al., 2010); trocador de calor tipo casco e tubo (FARAJOLLAHI; ETEMAD; HOJJAT, 2010); e transformadores elétricos (CHIESA; DAS, 2009; DU et al., 2012; LEE; KIM, 2012).

Em transformadores elétricos, a utilização de nanofluidos visa a uma melhor transferência de calor do sistema de bobinas e núcleos para o meio externo, sendo que, esta transferência é normalmente por convecção natural. Alguns resultados sobre a utilização de nanofluidos em sistemas regidos por convecção natural são apresentados abaixo, devido à relação destes sistemas com o presente trabalho.

Putra, Roetzel e Das (2003) avaliaram experimentalmente a convecção natural de nanofluidos de  $Al_2O_3$  e  $CuO$  em água, no interior de uma cavidade com uma superfície mantida a uma temperatura mais elevada, uma superfície mantida a uma temperatura inferior e as outras superfícies devidamente isoladas. Verificou-se que comparativamente ao fluido de base, a utilização dos nanofluidos resultou em uma deterioração na convecção, com números de Nusselt menores para o mesmo número de Rayleigh.

Khanafer, Vafai e Lightstone (2003) avaliaram numericamente a convecção natural de nanofluidos em uma cavidade bidimensional, utilizando um modelo para a condutividade térmica dos nanofluidos, no qual o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos é dependente da dispersão térmica, sendo esta, relacionada com os seguintes parâmetros: dimensão da nanopartícula, concentração volumétrica e do campo de velocidade. Os autores utilizaram nanopartículas de cobre, com concentrações volumétricas em água de até 25%. Foi verificado que o aumento da concentração volumétrica das nanopartículas, levou a um aumento no transporte da energia, devido à movimentação aleatória das nanopartículas, que

aumentou a dispersão térmica e consequentemente a condutividade térmica dos nanofluidos, elevando portanto, a capacidade de troca térmica do fluido.

Aminossadati e Ghasemi (2009) simularam numericamente o escoamento laminar de nanofluidos à base de água em uma cavidade com um dissipador de calor localizado na superfície inferior da cavidade, com o objetivo de avaliar a convecção natural sob diferentes números de Rayleigh, diferentes concentrações volumétricas, diferentes nanopartículas e também diferentes posições e tamanhos do dissipador de calor. Eles consideraram os nanofluidos como fluidos monofásicos, com as propriedades modificadas, sendo que a viscosidade e a condutividade térmica foram estimadas utilizando as expressões de Brinkman (1952) e Maxwell (1873), respectivamente. Para tanto, foram utilizadas nanopartículas esféricas de  $Cu$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  e  $Ag$ . Os autores mostraram que com o incremento da concentração volumétrica, a temperatura máxima do dissipador de calor foi reduzida, sendo este efeito mais pronunciado para menores números de Rayleigh, ou seja, onde o transporte difusivo é mais representativo. Os resultados deles, para diferentes nanopartículas, mostraram que os nanofluidos, com nanopartículas de maior condutividade térmica ( $Ag$  e  $Cu$ ), apresentaram maiores números de Nusselt médio no dissipador de calor.

Abu-Nada et al. (2010) simularam numericamente o escoamento de nanofluidos de  $Al_2O_3$  e  $CuO$  à base de água em uma cavidade fechada. As propriedades dos nanofluidos foram avaliadas com dependência da temperatura. Os autores obtiveram como resultado que o número de Nusselt médio dos nanofluidos apresentou um leve aumento a baixos números de Rayleigh, enquanto que, para altos números de Rayleigh, com o incremento da concentração volumétrica, o número de Nusselt dos nanofluidos foi reduzido, comparado ao do fluido de base.

Guimarães e Menon (2013) realizaram simulações numéricas do escoamento de nanofluidos de água- $Cu$  e água- $TiO_2$  e água- $Al_2O_3$ , a baixas concentrações volumétricas, em uma cavidade com uma região sólida, que dissipava calor no interior da cavidade, com o objetivo de avaliar a transferência de calor utilizando nanofluidos. A avaliação das propriedades dos nanofluidos foi realizada utilizando expressões clássicas, como de Maxwell (1873) e

Brinkman (1952). Os autores não obtiveram um aumento expressivo no número de Nusselt para as concentrações volumétricas utilizadas.

Apesar de existirem alguns trabalhos relacionados a escoamentos de nanofluidos em cavidades, que podem representar (de modo simplificado) a situação física no interior de um transformador elétrico, a maioria dos resultados é de nanofluidos à base de água e utilizando expressões clássicas para estimar a condutividade térmica e a viscosidade, expressões estas, que não estimam adequadamente as propriedades dos nanofluidos. Com o objetivo de corroborar a pesquisa na aplicabilidade de nanofluidos em transformadores elétricos, este trabalho apresenta resultados das medições das propriedades de nanofluidos à base de óleo de transformador e resultados numéricos do escoamento, por convecção natural, de nanofluidos no interior de cavidades fechadas, avaliando a troca térmica com os nanofluidos e com o fluido de base. Portanto, o presente trabalho apresenta singular relevância na pesquisa sobre a aplicabilidade de nanofluidos em transformadores elétricos.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA**

Nesta seção são descritos os procedimentos utilizados para a análise numérica do escoamento laminar de dispersões de nanopartículas em óleo de transformador elétrico no interior de cavidades, sendo uma destas cavidades com uma configuração representativa de um transformador elétrico. A metodologia utilizada é apresentada na sequência, sendo composta pelos seguintes itens: preparação das dispersões; medição das propriedades; modelagem física do problema; modelagem matemática; e metodologia numérica.

#### **3.1 Modelagem física**

Um transformador elétrico é um equipamento normalmente utilizado para elevar ou reduzir a tensão elétrica, mantendo-se constante a frequência da corrente elétrica. Na Fig. 3.1 tem-se uma ilustração de um transformador elétrico. Abstendo-se de uma descrição detalhada do processo de mudança de tensão em um transformador elétrico, pode-se dizer que este processo faz com que a energia interna do conjunto bobina e núcleo, expressa na forma de temperatura, aumente. Esta energia deve ser transferida de modo eficiente para o meio externo devido às limitações de temperatura para operação adequada do transformador elétrico. Esta



transferência de energia para o meio externo é realizada por meio de óleo (óleo de transformador elétrico - OTE), que envolve as bobinas e o núcleo no interior do transformador elétrico, geralmente por mecanismo de convecção natural, não exclusivamente, podendo ser feita por convecção forçada pela utilização de uma bomba. O OTE tem duas funções principais: servir como dielétrico e transferir o calor gerado nas bobinas e no núcleo para o meio externo. Na Fig. 3.2 tem-se um esquema representativo do interior de um transformador elétrico, onde é possível ver o sentido do escoamento do OTE.



Figura 3.1 – Ilustração de um transformador elétrico.

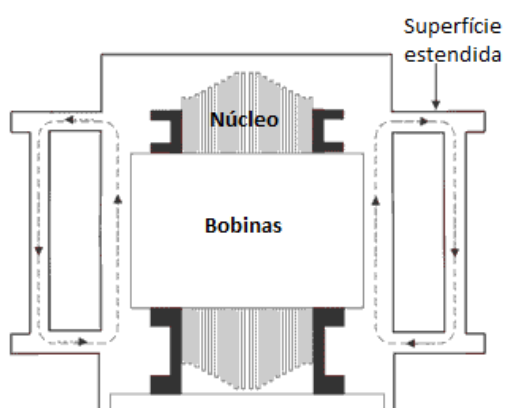


Figura 3.2 – Esquema representativo no interior de um transformador elétrico.

Presume-se que a utilização de nanopartículas dispersas em OTE deva aumentar a capacidade de troca térmica, visto que, o resultado da dispersão de nanopartículas em um

líquido, nanofluido, como já explanado, apresenta maior condutividade térmica.

Com intuito de analisar numericamente a transferência de energia interna por mecanismo de convecção natural utilizando dispersões à base de OTE, foram adotadas duas configurações simplificadas com suas respectivas condições de contorno, onde ambas configurações foram baseadas na Fig. 3.2. As duas configurações utilizadas na modelagem física, configuração A e configuração B, têm sua forma bidimensional e tridimensional, sendo que, a forma bidimensional se remete a uma cavidade quadrada, enquanto que a forma tridimensional se remete a uma cavidade cúbica.

A configuração A, 3.3, mais simplificada, consiste de uma cavidade quadrada, para a forma bidimensional, e cúbica, para a forma tridimensional, ambas de dimensão  $L$ , com temperaturas impostas nas paredes laterais, sendo temperatura alta,  $T_H$ , na lateral esquerda e temperatura baixa,  $T_L$ , na lateral direita, e as outras paredes adiabáticas. As condições de contorno para velocidade são de não deslizamento e impenetrabilidade nas paredes.

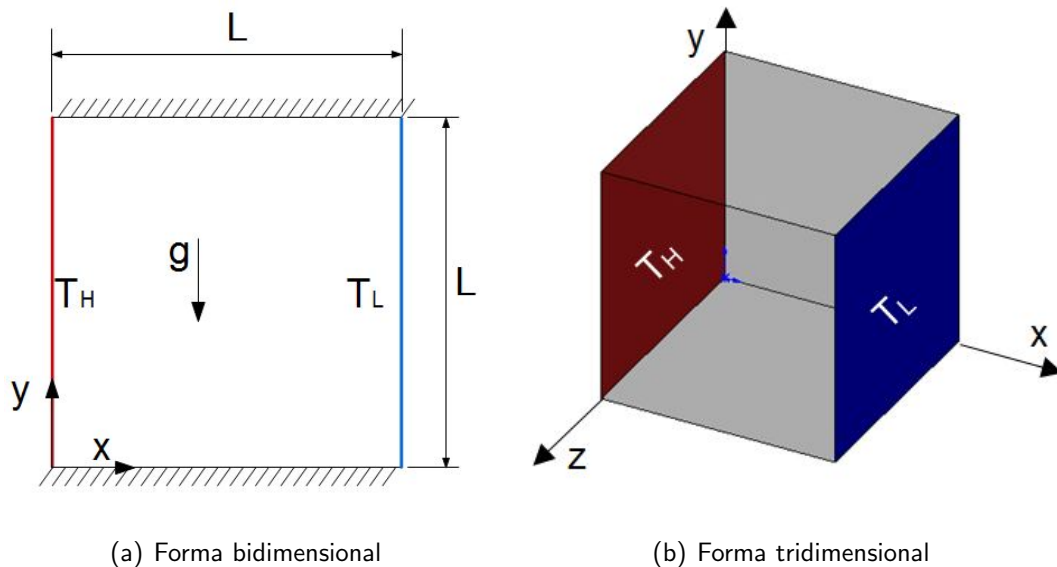


Figura 3.3 – Configuração A para modelagem física do problema.

Já a configuração B, 3.4, que representa de forma mais próxima a geometria no interior de um transformador elétrico, é composta por uma cavidade cúbica (forma tridimensional) ou quadrada (forma bidimensional), ambas de dimensão  $L$ , com um núcleo sólido, na forma de um paralelepípedo para a cavidade tridimensional, e na forma de um retângulo para a

cavidade bidimensional, localizada exatamente no centro da superfície inferior da cavidade. O núcleo apresenta base quadrada de dimensão  $L/3$ , com altura de  $L/2$ . As condições de contorno para a energia são: núcleo com temperatura alta; superfícies laterais e superior com temperatura baixa; e superfície inferior adiabática. As condições de contorno para a velocidade nesta geometria são de não deslizamento e impenetrabilidade nas paredes no núcleo.

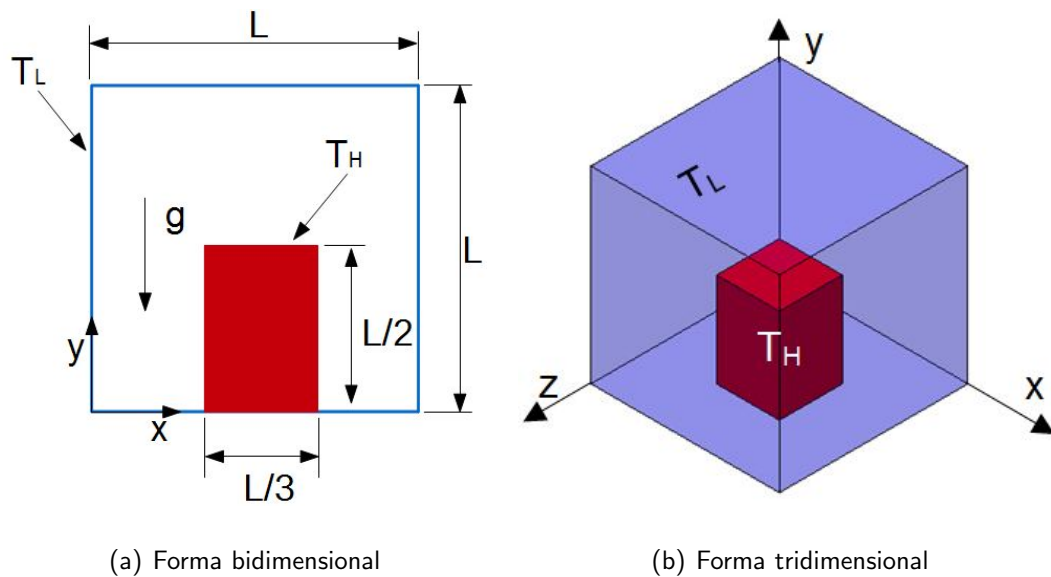


Figura 3.4 – Configuração B para modelagem física do problema.

Com o intuito de simplificar a solução do problema algumas hipóteses foram adotadas na modelagem física:

- Fluido newtoniano;
- Escoamento monofásico, considerando que o sistema nanopartículas e líquido comporta-se como escoamento monofásico, ainda que seja um escoamento bifásico;
- Análise para a faixa de escoamento laminar;
- Análise do escoamento em regime permanente;
- Propriedades do fluido constantes, exceto para a massa específica, onde é utilizada a aproximação de Boussinesq e;
- Escoamento incompressível.

As propriedades físicas das dispersões e do OTE utilizados para simulação numérica foram obtidas por meio de equações teóricas e por meio de medições experimentais, sendo que, a massa específica e o calor específico das dispersões foram obtidos utilizando-se as Eq. (2.3) e Eq.(2.5), respectivamente, enquanto que, a condutividade térmica e a viscosidade foram medidas.

### 3.2 Modelagem matemática

Com o modelo físico convenientemente estabelecido, é possível escrever as equações representativas que satisfazem adequadamente à modelagem física adotada. Assim, pode-se escrever em notação indicial, na forma integral, que é aplicável a um volume infinitesimal, as equações de balanço de massa, Eq. (3.1), de balanço da quantidade de movimento, com a aproximação de Boussinesq, Eq. (3.2), e da energia, Eq. (3.3). As equações representativas para o modelo físico, levando-se em consideração as hipóteses adotadas, foram escritas na forma integral devido à maior facilidade em aplicá-las diretamente no método dos volumes finitos, apresentado na metodologia numérica, seção 3.3, onde maiores detalhes das equações representativas na forma integral podem ser encontrados em Ferziger e Perić (2002). Deve-se notar que, na representação em notação indicial, os termos em que aparecem índices repetidos indicam um somatório. Os índices variam de 1 a 3, sendo que 1, 2 e 3 representam, respectivamente, os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , com suas variáveis nos respectivos eixos.

$$\int_{sc} u_j n_j \cdot ds = 0, \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} u_i \cdot dv + \int_{sc} u_i u_j n_j \cdot ds = & - \int_{sc} \frac{\tilde{p}}{\rho} \delta_{ij} n_j \cdot ds + \int_{vc} [g_i - g_i \cdot \beta(T - T_\infty)] \cdot dv + \\ & + \int_{sc} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] n_j \cdot ds, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} T \cdot dv + \int_{sc} T u_j n_j \cdot ds = \int_{sc} \alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} n_j \cdot ds, \quad (3.3)$$

onde:  $u_i$  representa as três componentes do vetor velocidade,  $g_i$  é a componente do vetor aceleração da gravidade;  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrica;  $T_\infty$  é a temperatura na região sem influência de convecção natural;  $\nu$  é a viscosidade cinemática ou difusividade cinemática, dada pela razão da viscosidade dinâmica e a massa específica, Eq. (3.4);  $\alpha$  é a difusividade térmica dada pela Eq. (3.5), na qual  $\kappa$  é a condutividade térmica e  $c_p$  é o calor específico.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p} \quad (3.5)$$

Nas Eq. (3.1), Eq. (3.2) e Eq. (3.3),  $vc$  e  $sc$  correspondem respectivamente ao volume de controle (que para a solução contínua é um volume infinitesimal) e à superfície de controle do volume de controle;  $n$  é o versor normal à superfície de controle, que aponta para fora do volume de controle; e  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker, que assume valor unitário quando  $i = j$  e é nulo quando  $i \neq j$ .

O campo de pressão, que é denotado por  $\tilde{p}$ , será substituído na equação de balanço da quantidade de movimento por uma pressão modificada,  $p$ . Tal substituição será realizada para omitir o termo da aceleração da gravidade nas equações adimensionais do balanço de quantidade de movimento. Esta pressão modificada é obtida pela Eq. (3.6).

$$-\int_{sc} \frac{p}{\rho} \delta_{ij} n_j \cdot ds = -\int_{sc} \frac{\tilde{p}}{\rho} \delta_{ij} n_j \cdot ds + \int_{vc} g_i \cdot dv \quad (3.6)$$

Assim, pode-se reescrever a equação do balanço da quantidade de movimento, Eq. (3.7), sem o termo da aceleração da gravidade, não significando que este termo está sendo desprezado. Deve-se notar no entanto, que o campo de pressão na solução numérica representa um campo de pressão que tem a influência do campo gravitacional.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} u_i \cdot dv + \int_{sc} u_i u_j n_j \cdot ds = & -\int_{sc} \frac{p}{\rho} \delta_{ij} n_j \cdot ds - \int_{vc} g_i \cdot \beta(T - T_\infty) \cdot dv + \\ & + \int_{sc} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] n_j \cdot ds \end{aligned} \quad (3.7)$$

Realizou-se a adimensionalização das equações representativas, com o objetivo de tornar os resultados mais gerais e poder fazer uma análise deste problema sem estimar o coeficiente de expansão volumétrica das dispersões de nanopartículas, propriedade esta que não apresenta uma correlação teórica comprovada experimentalmente e cuja medição experimental não é trivial. Assim, as variáveis do problema foram adimensionalizadas, da seguinte forma:

- $U_i = \frac{u_i \cdot L}{\nu}$ ;
- $X_i = \frac{x_i}{L}$ ;
- $\theta = \frac{T - T_L}{T_H - T_L} = \frac{T - T_L}{\Delta T}$ ;
- $P = \frac{p \cdot L^2}{\nu^2 \rho}$  e;
- $\tau = \frac{t \cdot \nu}{L^2}$ .

Onde:  $L$  é a dimensão da cavidade (lado da cavidade) e  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas alta e baixa ( $T_H - T_L$ ) no interior da cavidade.

Com estas variáveis adimensionais, as equações representativas na forma adimensional podem ser expressas pelas Eq. (3.8), Eq. (3.9), Eq. (3.10), respectivamente para o balanço de massa, balanço de quantidade de movimento e energia.

$$\int_{SC} U_j n_j dS = 0 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{VC} U_i dV + \int_{SC} U_i U_j n_j dS = & - \int_{SC} P \delta_{ij} n_j dS - \int_{VC} Gr \cdot \theta \cdot dV + \\ & + \int_{SC} \left[ \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] n_j dS \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{VC} \theta \cdot dV + \int_{SC} \theta U_j n_j \cdot dS = \int_{SC} Pr^{-1} \frac{\partial \theta}{\partial X_j} n_j \cdot dS, \quad (3.10)$$

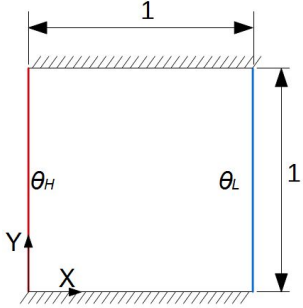
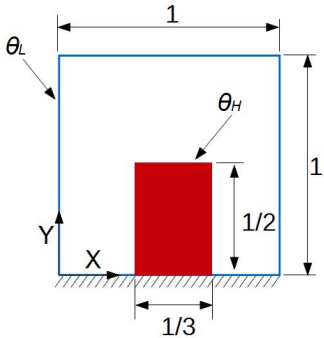
onde:

- $Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2}$  e;
- $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ ,

sendo que, o número de Grashof,  $Gr$ , será imposto conforme condição do escoamento a ser analisada.

As propriedades para calcular o número de Prandtl são as do nanofluido ou do fluido de base, assim, o número de Prandtl é quem define qual fluido está sendo avaliado, se nanofluido ou OTE. Portanto, as simulações são realizadas considerando que os nanofluidos são na verdade um fluido comum com propriedades modificadas. As propriedades dos nanofluidos e do OTE são apresentadas no capítulo de resultados, capítulo 4.

Tabela 3.1: Resumo da modelagem matemática.

Configuração	Variáveis	Equações representativas	Condições de contorno
	Velocidade - $U$ , $V$ e $W$	Eq. 3.9	Paredes $\rightarrow U = V = W = 0$
	Temperatura - $\theta$	Eq. 3.10	Superfície aquecida $\rightarrow \theta_H = 1$ , Superfície resfriada $\rightarrow \theta_L = 0$ , Superfície adiabática $\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$
	Velocidade - $U$ , $V$ e $W$	Eq. 3.9	Paredes $\rightarrow U = V = W = 0$ , Núcleo $\rightarrow U = V = W = 0$
	Temperatura - $\theta$	Eq. 3.10	Superfície aquecida $\rightarrow \theta_H = 1$ , Superfície resfriada $\rightarrow \theta_L = 0$ , Superfície adiabática $\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$

Partindo das condições de contorno descritas no modelo físico, podem-se obter as condições de contorno para as variáveis adimensionais do problema, que juntamente com as equações representativas adimensionais, serão utilizadas para obter a solução numérica através da metodologia numérica, que será apresentada mais adiante. Assim, o valor das componentes de velocidade nas condições de contorno (paredes) é zero, e para a temperatura, as condições de contorno são: temperatura alta igual a um e temperatura baixa igual a zero. Na Tab. 3.1 é apresentado um resumo da modelagem matemática com as condições de contorno e as



equações representativas adimensionais utilizadas nas configurações A e B.

Um parâmetro adimensional de importância na análise do incremento da convecção é o número de Nusselt, definido pela Eq. (3.11). Valendo-se da definição do coeficiente de transferência de calor,  $h$ , Eq. (3.12) e reconhecendo que o fluxo de calor na superfície analisada (para configuração A, a parede vertical aquecida) pode ser dado pela Eq. (3.13), pode-se escrever o número de Nusselt local em função apenas da solução do campo de temperatura adimensional, dado pela Eq. (3.14), sendo que, o número de Nusselt médio é dado pela Eq. (3.15)

$$Nu = \frac{hL}{\kappa} \quad (3.11)$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T} \quad (3.12)$$

$$q'' = -\kappa \frac{\partial T}{\partial y} = -\kappa \frac{\Delta T}{L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (3.13)$$

$$Nu = -\frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (3.14)$$

$$\overline{Nu} = \int_{SC} Nu \cdot dS \quad (3.15)$$

### 3.3 Metodologia numérica

Com as modelagens física e matemática devidamente estabelecidas, esta seção se propõe à exposição da metodologia numérica utilizada para a solução numérica do escoamento dos nanofluidos e do fluido de base no interior de cavidades com configurações geométricas e condições de contorno acima especificadas.

A metodologia numérica utilizada é composta pela discretização das equações representativas do modelo matemático; esquemas de interpolação das variáveis; método de acoplamento pressão-velocidade; método de integração temporal (requerida devido ao tipo de solução do acoplamento pressão-velocidade); malha numérica e; solução das equações algébricas. Esta metodologia foi aplicada a ambos os códigos computacionais utilizados.

#### 3.3.1 Discretização - Método dos Volumes Finitos

Discretização é um método de aproximar as equações representativas por meio de equações algébricas, de modo que, as variáveis associadas possam ser obtidas em alguns pontos espaciais e temporais (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Existem diversos métodos de discretização, dos quais, os mais difundidos são: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF). Neste trabalho utilizou-se o MVF para a discretização das equações representativas do modelo matemático.

O método dos volumes finitos é baseado na forma integral das equações representativas, conforme já apresentadas na modelagem matemática, podendo também ser utilizada as equações diferenciais, sendo que neste caso, integrações sobre um volume finito devem ser realizadas. O método consiste na aplicação das equações representativas sobre todos os volumes finitos que compõem uma malha numérica, que por sua vez, deve representar adequadamente (conforme o interesse da análise) os fenômenos físicos associados.

As equações representativas foram aplicadas para volumes finitos de uma malha ortogonal e não uniforme, onde os nós que representam os volumes finitos localizam-se

no centro de cada volume finito associado. Na Fig. 3.5 é mostrada uma representação bidimensional dos volumes finitos em uma malha deslocada, ortogonal e não uniforme com as devidas nomenclaturas utilizadas na discretização das equações representativas.

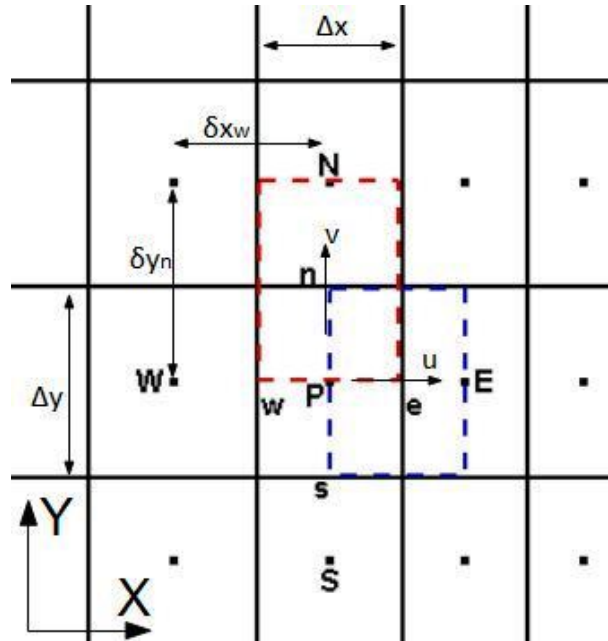


Figura 3.5 – Diagrama de malha ortogonal, deslocada e não uniforme.

No método de discretização dos volumes finitos, o valor das variáveis em todo o interior de um volume finito é o valor da variável no centroide deste volume finito. Assim, na discretização das equações representativas utilizadas na solução numérica, os termos onde aparecem integrais de volume podem ser aproximados conforme Eq. (3.16), onde se utilizou para exemplificação o segundo termo do lado direito da Eq. (3.9).

$$\int_{VC} Gr \cdot \theta \cdot dV = Gr \cdot \theta_P \cdot \Delta V \cong Gr \cdot \theta_P \cdot \Delta V \quad (3.16)$$

Já as integrais de superfície que aparecem nas equações representativas são dadas pelo somatório das integrais em cada face do volume finito, quatro faces, se bidimensional, e seis faces, se tridimensional. Assim, as integrais de superfície são obtidas conforme Eq. (3.17), exemplificada com o segundo termo do lado esquerdo da Eq. (3.9).

$$\int_{SC} U_i U_j n_j dS = \sum_k \int_{SC_k} U_i U_j n_j dS, \quad (3.17)$$

onde, o índice  $k$  indica a face analisada do volume finito no somatório, variando de um a seis para o caso tridimensional, e de um a quatro para o caso bidimensional.

As integrais em cada face são dadas pelos valores médios das variáveis nas faces associadas, multiplicados pelas respectivas áreas das faces. Este resultado então é estimado pela regra do ponto médio, onde os valores médios são substituídos pelo valor no centroide da face. Na Eq. (3.18) é apresentada, com o mesmo termo utilizado na Eq. (3.17), a aproximação da integral para a face  $e$  do volume finito.

$$\int_{SC_e} U_i U_j n_j dS = \bar{U}_i|_e \bar{U}_j|_e S_e \cong U_i|_e U_j|_e S_e \quad (3.18)$$

A avaliação dos termos que apresentam derivadas de uma propriedade em algum ponto específico do volume finito (faces ou no centroide) foi feita considerando variações lineares. Na Eq. (3.19), é mostrado como foi feita a avaliação da derivada na face  $e$  de uma das derivadas que compõe o último termo da Eq. (3.9). Tal procedimento foi utilizado para cada termo específico, conforme ponto analisado.

$$\left. \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right|_e = \frac{U_{iE} - U_{iP}}{X_{jE} - X_{jP}} \quad (3.19)$$

Para avaliar as variáveis nas faces dos volumes finitos, utilizaram-se esquemas de interpolação. Na seção subsequente é apresentado o esquema de interpolação utilizado para as variáveis nas faces dos volumes finitos.

### 3.3.2 Esquema de interpolação

O esquema de interpolação utilizado foi o esquema de diferenças centrais, CDS (do inglês, *Central Difference Scheme*), que é um esquema de interpolação linear. A interpolação pelo CDS da variável  $\theta$  na face  $e$  pode ser feita pela Eq. (3.20), sendo que, a avaliação em outras faces é feita de modo análogo.

$$\theta_e = \lambda \theta_E + (1 - \lambda) \theta_P, \quad (3.20)$$

onde o termo  $\lambda$  pode ser calculado pela Eq. (3.21).

$$\lambda = \frac{X_e - X_P}{X_E - X_P} \quad (3.21)$$

Este esquema de interpolação leva a um erro de truncamento proporcional ao quadrado da dimensão do volume finito (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Com os esquemas de interpolação definidos, as equações representativas para o problema físico foram devidamente discretizadas. Para tanto, utilizou-se por conveniência, no tratamento do acoplamento pressão-velocidade, malha deslocada para o campo de velocidade. As características gerais da malha numérica utilizada são abordadas na próxima seção.

### 3.3.3 Malha numérica

As malhas numéricas utilizadas nos códigos são malhas estruturadas em coordenadas cartesianas, onde, devido a algumas vantagens, as componentes de velocidade foram avaliadas em malhas deslocadas. Na Fig. 3.5 é apresentado um diagrama de uma malha estruturada

não uniforme, onde é possível ver a malha principal, em que são avaliadas as propriedades do fluido, pressão e temperatura e as malhas secundárias, onde são avaliadas as componentes de velocidade, sendo que, a malha deslocada para a componente  $y$  de velocidade é mostrada em vermelho (deslocada na direção positiva do eixo vertical) e a malha deslocada para a componente  $x$  de velocidade é mostrada em azul (deslocada na direção positiva do eixo horizontal). Como vantagens na utilização de malha deslocada ao invés de malha colocada, em malha com configuração ortogonal, pode-se citar:

- Redução no número de interpolações. Para as equações de balanço de quantidade de movimento, os termos de pressão e de difusão são obtidos facilmente por aproximações por diferenças centrais;
- Cálculo do balanço de massa pode ser feito diretamente na malha principal, utilizando as componentes de velocidade, que são avaliadas nas faces do volume finito da malha principal;
- Forte acoplamento pressão-velocidade, evitando oscilações no campo de pressão e velocidade e problemas de convergência.

Com a malha numérica devidamente estabelecida, buscou-se um método de acoplamento pressão-velocidade para resolver as equações de balanço de quantidade de movimento, visto que, o escoamento é incompressível. Conforme é apresentado na seção seguinte, por apresentar facilidades de implementação, utilizou-se o método dos passos fracionados para o acoplamento pressão-velocidade.

### 3.3.4 *Acoplamento pressão-velocidade*

Para escoamentos incompressíveis não existe uma relação termodinâmica, na qual é possível obter uma equação para a pressão. Nestes casos a equação de balanço de massa funciona como uma restrição cinemática para o campo de velocidade. Portanto, deve-se gerar uma equação para a pressão, de tal modo que, a solução desta equação satisfaça o balanço

de massa. Tal procedimento trata-se do acoplamento pressão-velocidade. Existem diversos métodos de acoplamento da pressão com a velocidade, tais como Chorin, SIMPLE, SIMPLER, SIMPLER, etc., onde a ideia principal é obter uma equação para a pressão, tal que, a solução desta equação satisfaça a equação de balanço de massa. Na maioria dos casos, obtém-se para a pressão, por meio de operações matemáticas, uma equação de Poisson, cuja forma é mostrada na Eq. (3.22) para uma variável  $\varphi$  genérica dependente de um campo  $f$ .

$$\nabla^2 \varphi = f \quad (3.22)$$

O acoplamento pressão-velocidade foi feito utilizando o método dos passos fracionados (KIM; MOIN, 1985), onde o campo de velocidade é resolvido explicitamente e a pressão é resolvida implicitamente por uma equação de Poisson. Neste método, a solução do balanço de quantidade de movimento é transiente e a pressão no instante  $t + 1$  é obtida como sendo a pressão no instante  $t$  mais uma pressão de correção, conforme Eq. (3.23).

$$P^{t+1} = P^t + P' \quad (3.23)$$

Utilizado esta definição da pressão, Eq. (3.23), e o balanço de quantidade de movimento, juntamente com o balanço de massa, chega-se à pressão de Poisson para a pressão, Eq. (3.24).

$$\frac{\partial}{\partial X_j} \left( \frac{\partial P'}{\partial X_j} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\partial U_j^*}{\partial X_j} \right), \quad (3.24)$$

onde  $U_j^*$  corresponde à estimativa da velocidade, calculada de forma explícita pela equação de balanço de quantidade de movimento, que pelo fato de não apresentar o campo de pressão correto não leva a um divergente nulo da velocidade.

A Eq. (3.25) é a equação utilizada para corrigir o campo de velocidade, de tal modo que, após a correção, o campo de velocidade apresenta divergente nulo, atendendo assim, o balanço de massa.

$$U_i^{t+1} = U_i^{*t+1} - \Delta t \left( \frac{\partial P^*}{\partial X_j} \right)^{t+1} \quad (3.25)$$

Finalmente, o método de acoplamento pressão velocidade pode ser sumarizado da seguinte forma:

1. Estimativa explícita (algebricamente) do campo de velocidade, utilizando a equação de balanço de quantidade de movimento, Eq. (3.9);
2. Resolver o sistema linear advindo da equação de Poisson para pressão, Eq. (3.24);
3. Corrigir a velocidade estimada com a Eq. (3.25) e a pressão com a Eq. (3.23);
4. Verificar se o balanço de massa foi satisfeito em todo o domínio de cálculo;
5. Avançar para próximo passo de tempo.

Para solucionar a equação de Poisson da pressão de correção, que é uma equação implícita, utilizou-se para os casos bidimensionais o método iterativo de Gauss-Seidel com sobre relaxação (SOR, do inglês *Successiver Over Relaxation*), cujo desenvolvimento pode ser visto em Maliska (2004). Já para os casos tridimensionais, utilizou-se o método iterativo SIP (*Strongly Implicit Procedure*), proposto por Stone (1968).

Na sequência são apresentados os métodos de integração que foram utilizados para realizar a integração numérica das variáveis de velocidade e de temperatura.



### 3.3.5 Integração temporal

A integração temporal das variáveis de velocidade e temperatura foi realizada de forma explícita com métodos de segunda ordem, sendo que, para o código bidimensional foi utilizado o método de integração de Runge-Kutta e para o código tridimensional, utilizou-se o método de integração de Adams-Bashforth.

A utilização destes métodos de integração temporal de segunda ordem, juntamente com o método de discretização espacial utilizado, CDS (de segunda ordem), levou a uma acurácia do código de segunda ordem, ou seja, o erro no cálculo das variáveis diminui com o quadrado das dimensões da malha. Tal característica foi verificada no processo de verificação do código bidimensional, que foi sucedido pelo processo de validação, sendo este, o último procedimento na avaliação do código numérico desenvolvido.

### 3.3.6 Condições das análises numéricas

Feitas as considerações do modelo físico, matemático e a metodologia numérica, na Tab. 3.2 são apresentadas as condições de análise do escoamento para as configurações A e B, nas formas bidimensional e tridimensional. As condições do escoamento são dadas em função do número de Grashof, que é imposto, e o fluido analisado é inferido pelo número de Prandtl que depende das propriedades das amostras, cujos resultados das medições são apresentados no capítulo seguinte.

Tabela 3.2: Condições do escoamento, analisadas numericamente.

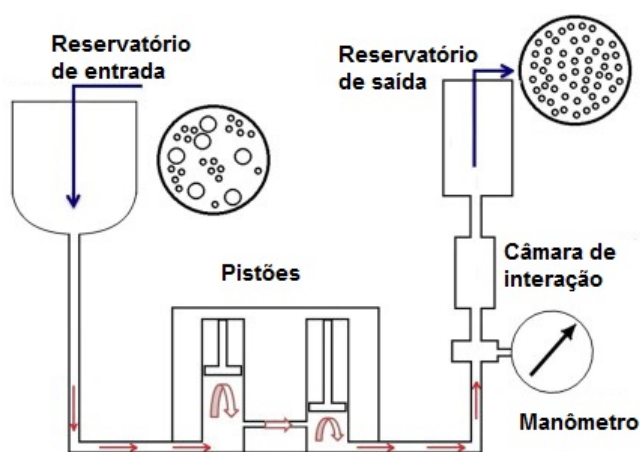
Forma	Configuração	Grashof
3D	A	$10^6$
	B	$10^4$

*Continua na página seguinte*

Forma	Configuração	Grashof
2D	A	$10^3$ - $10^6$
	B	$10^1$ - $10^4$

### 3.4 Preparação dos nanofluidos

A preparação das dispersões de nanopartículas em OTE foi realizada por meio de um método de dois passos, utilizando o homogeneizador a alta pressão que está instalado no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia, LEST-nano, da Universidade Federal de Uberlândia, cujo princípio de funcionamento foi devidamente explanado no capítulo 2 deste trabalho. Na Fig. 3.6 é apresentado um diagrama esquemático, adaptado de BANDARRA FILHO et al. (2014), do homogeneizador utilizado para preparação das dispersões e uma imagem do manômetro do equipamento no momento em que estava sendo utilizado.



(a) Diagrama esquemático



(b) Equipamento em operação

Figura 3.6 – Homogeneizador a alta pressão.

Para a preparação das dispersões à base de OTE foram utilizadas nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) e nanopartículas de diamante. Na Tab.

3.3 são apresentados os valores, fornecidos pelo fabricante, das características geométricas das nanopartículas, a saber, o diâmetro externo e o comprimento (quando aplicável), além de algumas propriedades aproximadas das nanopartículas, obtidas de tabelas de propriedades e dados do fabricante. Estas nanopartículas apresentam pureza relatada acima de 97% e 95%, respectivamente para diamante e MWCNT, sendo que, o diâmetro interno das nanopartículas de MWCNT, que não é apresentado na Tab. 3.1, varia de 3-5 nm, segundo informações do fabricante.

Tabela 3.3: Algumas características e propriedades das nanopartículas utilizadas.

Nanopartícula	Diâmetro (comprimento) [nm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kg.K]	$\kappa$ [W/m.K]
Diamante	3,5-6,5 (***)	3520	630	$\approx 2000$
MWCNT	8-15 (10000-50000)	2100	710	$\approx 3500$

Para fins de comparação com as informações fornecidas pelo fabricante, foram realizadas visualizações das nanopartículas no microscópio eletrônico de transmissão (MET), com aumento máximo de 250000 vezes, modelo EM-109, da ZEISS, Fig. 3.7, instalado no centro de microscopia avançada da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.



Figura 3.7 – Imagem do MET, modelo EM-109 da ZEISS.

Com o MET, foi possível obter algumas imagens das nanopartículas utilizadas neste trabalho, que são apresentadas na Fig. 3.8, onde é possível observar que as nanopartículas apresentam dimensões e características geométricas bem próximas às referidas pelo fabricante.

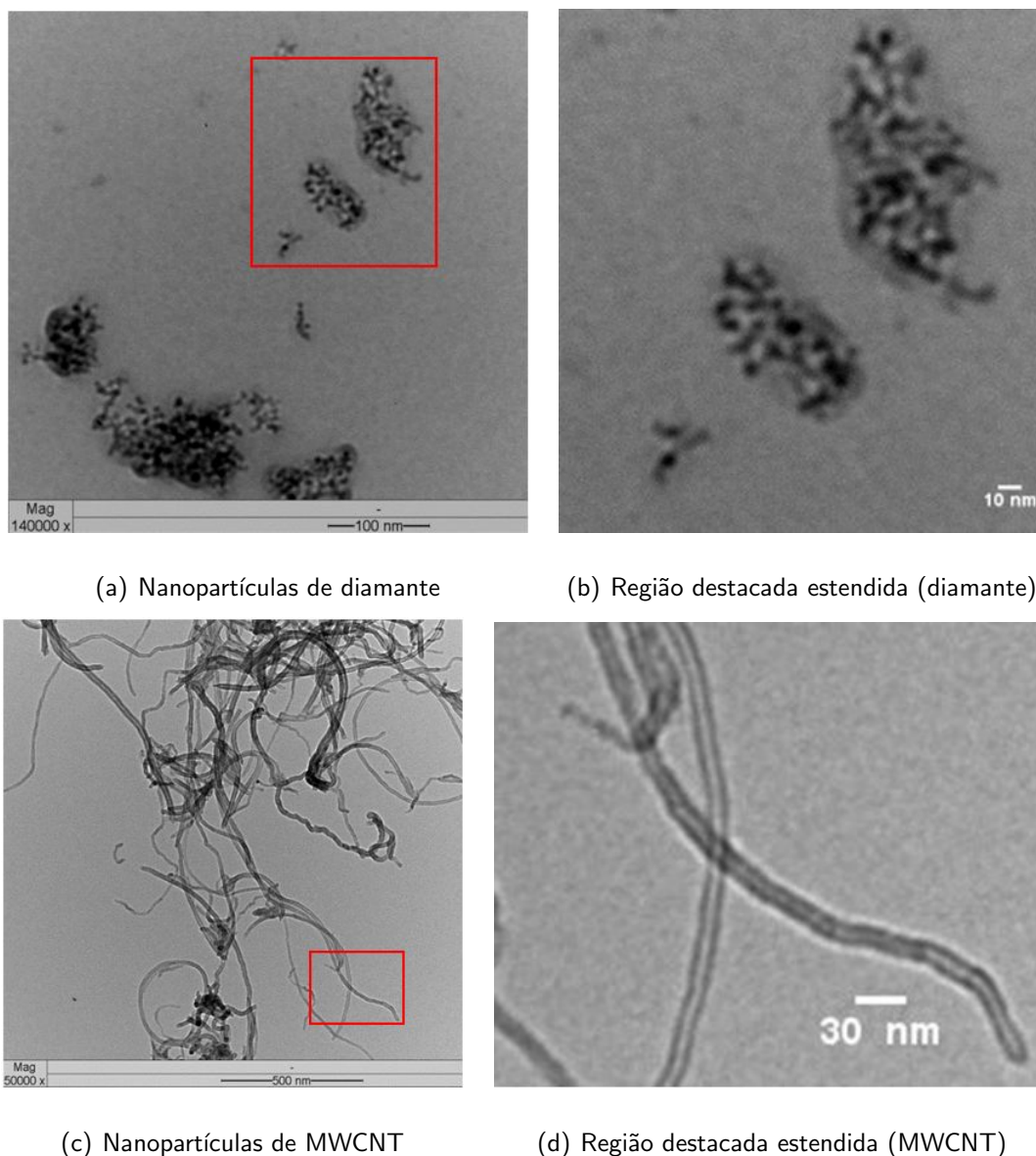


Figura 3.8 – Imagens obtidas no MET das nanopartículas de diamante e de MWCNT.

Um volume de aproximadamente 12 litros de OTE foi obtido no laboratório de transformadores elétricos da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, do qual, uma amostra de 1,5 litro de OTE puro foi separada, e com 9 litros foram produzidas seis amostras de dispersões de nanopartículas em OTE, todas com volume de 1,5 litro. Cada amostra foi preparada em volumes de 500 ml, devido à capacidade volumétrica do homogeneizador. Para tanto, calculou-se as massas necessárias para obter as concentrações volumétricas desejadas, conforme Eq. (3.26), levando-se em consideração uma perda de 10% de massa de nanopartículas durante o processo de produção das dispersões no homogeneizador,

transporte e manuseio. A percentagem de perda de massa de nanopartículas considerada é baseada em valores típicos encontrados em secagens de amostras realizadas no LEST-nano.

$$m_{np} = 1,1 \cdot \frac{\rho_{np} \phi V_{fb}}{(1 - \phi)}, \quad (3.26)$$

onde,  $\rho_{np}$ ,  $\phi$  e  $V_{fb}$ , representam respectivamente, a massa específica da nanopartícula (dado fornecido pelo fabricante), a concentração volumétrica desejada e o volume do fluido de base utilizado na preparação. Na Tab. 3.4 são apresentadas as denominações adotadas para cada amostra analisada, indicando as nanopartículas utilizadas, as respectivas concentrações volumétricas e as massas de nanopartículas utilizadas para um volume de 500 ml de OTE, com base na Eq. (3.26).

Tabela 3.4: Denominações das dispersões e massas de nanopartículas necessárias para obtenção das dispersões.

Designação	$\phi$ [%]	Massa necessária [g]
OTE	0,000	0,000
ODI1	0,005	0,097
ODI2	0,010	0,194
ODI3	0,050	0,968
ONT1	0,005	0,058
ONT2	0,010	0,116
ONT3	0,050	0,578

As massas requeridas de nanopartículas para obter as concentrações volumétricas das dispersões foram medidas numa balança com resolução de um milésimo de grama, Fig. 3.9,

modelo GEHAKA BK500, instalada no LEST-nano, onde os valores medidos das massas das nanopartículas de diamante e de MWCNT, para uma das séries de amostras de 500 ml, são apresentados na Tab. 3.5.



Figura 3.9 – Balança com resolução de um milésimo de grama.

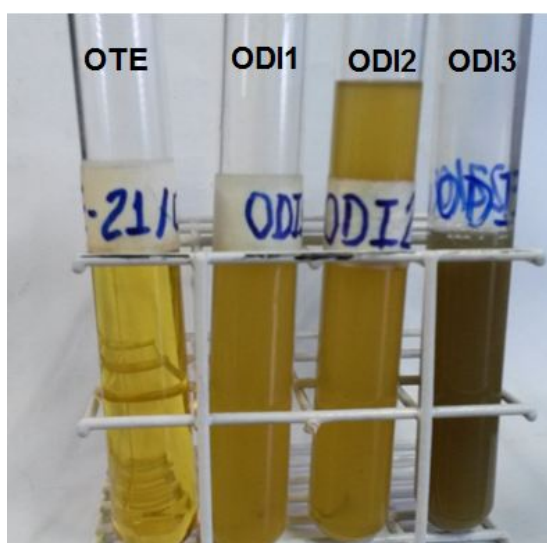
Tabela 3.5: Medições das massas para uma série de amostras.

Designação	Massa medida $\pm 0,001$ [g]
ODI1	0,098
ODI2	0,194
ODI3	0,961
ONT1	0,057
ONT2	0,116
ONT3	0,576

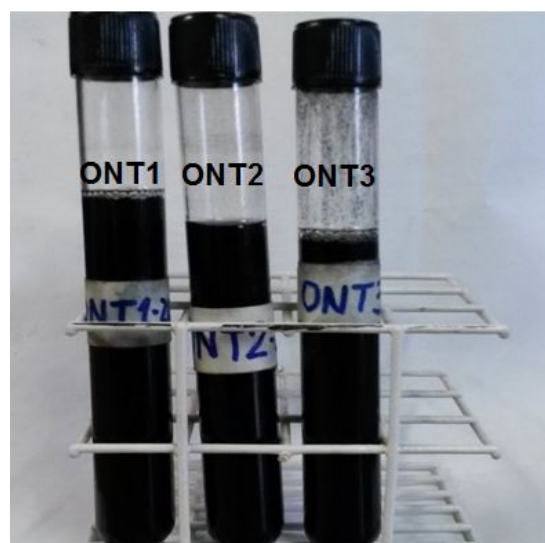
Com as massas das nanopartículas devidamente medidas para um volume de 500 ml

de OTE, realizou-se uma pré mistura das nanopartículas com o óleo em um recipiente, que posteriormente, foi depositada no homogeneizador. O tempo no qual as amostras foram mantidas no homogeneizador dependeu do aspecto visual da mistura e da estabilização da pressão na qual a mistura estava submetida. Sob estes critérios, as dispersões de nanopartículas de MWCNT em OTE foram homogeneizadas aproximadamente por um período de duas horas, enquanto que as dispersões de diamante em OTE foram homogeneizadas aproximadamente por um período de 40 min.

Seguindo o procedimento descrito acima, foram obtidas três amostras de dispersões de nanopartículas de MWCNT em OTE e três amostras de dispersões de nanopartículas de diamante em OTE. Na Fig. 3.10 podem ser vistas imagens das amostras em tubos de ensaios, assim como a amostra de OTE puro.



(a) OTE e dispersões de diamante em OTE



(b) Dispersões de MWCNT EM OTE

Figura 3.10 – Amostras de OTE e dispersões.

A avaliação da estabilidade e homogeneidade da mistura foi feita de forma visual, sendo que, as amostras ODI1 e ODI2 permaneceram visualmente estáveis e bem dispersas por mais 24 horas, enquanto que, as amostras ONT1, ONT2, ONT3 e ODI3 não permaneceram estáveis por mais de 3 horas.

Em termos de custo financeiro as nanopartículas são consideravelmente caras



atualmente, sendo que as nanopartículas de diamante apresentam maior custo. Porém, deve-se salientar que os custos de produção de nanopartículas estão sendo reduzidos com o desenvolvimento tecnológico.

### **3.5 Medição das propriedades**

Devido à possível utilização de dispersões de nanopartículas em OTE no interior de transformadores elétricos, foram estimadas cinco propriedades das amostras produzidas, sendo estas, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, calor específico, massa específica e rigidez dielétrica (pela medição da tensão de ruptura). Algumas propriedades das amostras, a saber, condutividade térmica, viscosidade dinâmica e rigidez dielétrica, foram obtidas experimentalmente, enquanto que as outras duas propriedades foram obtidas por relações teóricas já apresentadas no capítulo 2 deste trabalho, sendo que, a massa específica foi estimada pela Eq. (2.3) e o calor específico foi estimado pela Eq. (2.5).

#### *3.5.1 Condutividade térmica*

As medições da condutividade térmica foram realizadas à temperatura ambiente, utilizando o método transiente do fio quente (NAGASAKA; NAGASHIMA, 1981), que tem sido considerado um método eficiente para medir condutividade térmica de nanofluidos, por reduzir efeitos de convecção natural e por apresentar resposta mais rápida que métodos de medição estacionários (MURSHED; LEONG; YANG, 2008). Na Fig. 3.11 é mostrado o aparato experimental utilizado no laboratório de refrigeração da Escola de Engenharia de São Carlos (USP-EESC), o OTE e a glicerina utilizada para a calibração do equipamento. O procedimento adotado para medição da condutividade térmica seguiu orientações da norma ASTM D5334-08, que estabelece a condutividade térmica como sendo o resultado da relação linear da temperatura com o tempo, das propriedades geométricas do fio e do calor dissipado, sob a hipótese de que o meio, no qual o fio é imerso, é homogêneo e isotrópico e o fio é uma

fonte de calor ideal, Eq. (3.27).

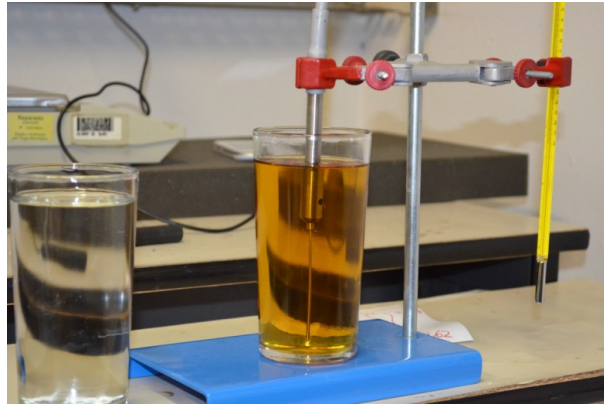


Figura 3.11 – Aparato experimental do método do fio quente.

$$\kappa = \left[ \frac{q'}{4\pi (T_2 - T_1)} \right] \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3.27)$$

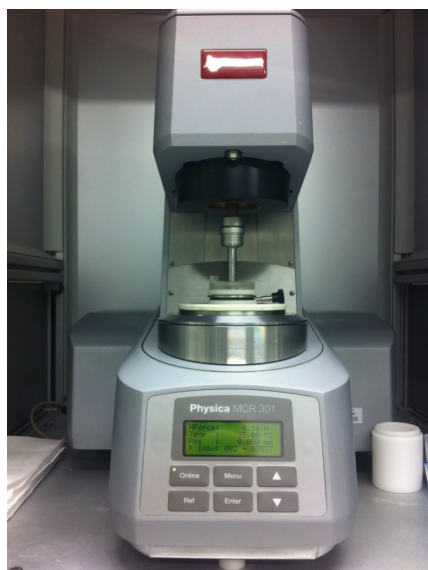
Onde:  $t_1$  e  $t_2$  representam, respectivamente, os tempos inicial e final, em que o acréscimo de temperatura com o tempo é linear; e  $T_1$  e  $T_2$  são as respectivas temperaturas nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ .

Antes de realizar as medições da condutividade térmica das amostras, realizou-se a calibração do equipamento com glicerina, cuja condutividade térmica era conhecida. Desta calibração obteve-se um desvio menor que 1% do valor médio das medições de condutividade térmica e o valor de referência da condutividade térmica da glicerina na temperatura em que foram realizadas as medições. Tanto na calibração do equipamento quanto nas medições da condutividade térmica das amostras de nanofluidos foram realizadas cinco medições de condutividade térmica à temperatura ambiente, que era em torno de 20 °C.

Considerou-se a acurácia das medições de condutividade térmica das amostras conforme especificado pelo fabricante,  $\pm 3\% + 0,02 \text{ W/m.K}$ .

### 3.5.2 Viscosidade dinâmica

As viscosidades dinâmicas das amostras foram medidas utilizando os reômetros de tensão controlada Physica MCR 301 e 501, da Anton Paar, Fig. 3.12, instalados no laboratório de reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). A geometria utilizada para medição da viscosidade foi a de cilindros concêntricos, Fig. 3.13, por apresentarem maior área de contato com o fluido, permitindo medir uma faixa de viscosidade na qual a viscosidade do OTE está inserida.



(a) MCR 301



(b) MCR 501

Figura 3.12 – Reômetros utilizados nas medições das viscosidades das amostras.

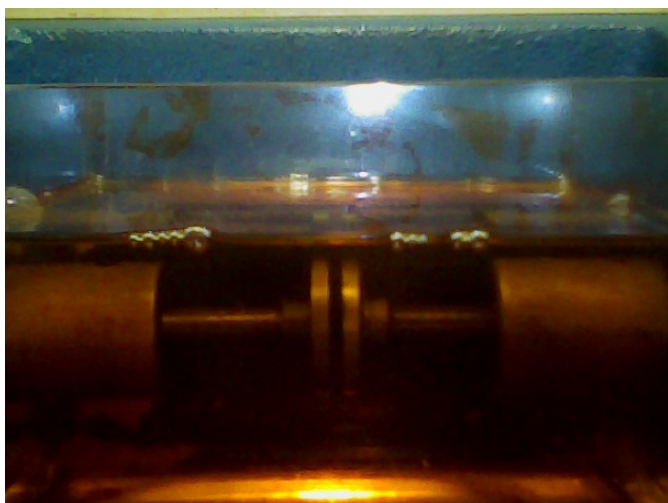


Figura 3.13 – Cilindros concêntricos utilizados para avaliar o comportamento reológico.

As curvas do comportamento reológico das amostras foram obtidas à temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C, para uma faixa de cisalhamento de 0,001-100 s<sup>-1</sup>, sendo que, o limite inferior utilizado desta faixa depende da confiabilidade da medição do torque pelo reômetro, que é dependente da amostra. Cada amostra foi mantida por um tempo de 300 s em uma mesma taxa de cisalhamento (obtida pela velocidade angular dos cilindros), de onde se obteve o valor médio de seis medições da tensão cisalhante (obtida pela medição do torque necessário para manter a velocidade angular dos cilindros). Este procedimento foi realizado no mínimo duas vezes para cada amostra, com intuito de verificar os dados medidos. Assim, foi possível avaliar o comportamento (newtoniano, pseudoplástico ou dilatante) de cada amostra com a taxa de cisalhamento, e para as amostras que apresentaram comportamento newtoniano, determinou-se a viscosidade dinâmica.

### 3.5.3 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica das amostras foi estimada utilizando o analisador de rigidez dielétrica EletricTestSerta do laboratório de transformadores elétricos da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. O medidor de rigidez dielétrica tem uma cuba acrílica, onde é depositado o fluido para medição, que é submetido à tensão elétrica com corrente alternada, por meio de eletrodos de bronze de diâmetro de 25,4 mm, espaçados de 2,54 mm. Assim, a rigidez dielétrica é dada pelo valor medido da tensão de ruptura dividido pela distância dos eletrodos, mas por ser uma distância padronizada, o valor da rigidez dielétrica será analisado simplesmente como sendo o valor da tensão de ruptura. Na Fig. 3.14 pode ser vista a cuba acrílica com OTE, onde é possível observar os eletrodos que submetem a amostra à tensão elétrica, que foi ajustada manualmente a uma taxa aproximadamente constante.



(a) Cuba do medidor de rigidez dielétrica



(b) Visão geral do medidor

Figura 3.14 – Medidor de rigidez dielétrica ElectricTestSerta.

As medições da rigidez dielétrica das amostras foram realizadas com a cuba preenchida com um volume aproximado de 1 l, volume suficiente para cobrir completamente os eletrodos. Para cada amostra foram realizadas cinco medições da tensão de ruptura, com intervalos de um minuto entre cada medição, para que a porção do fluido, entre os eletrodos, que foi ionizada pudesse ser substituída por uma porção de fluido que não foi ionizada. Finalmente, considerou-se como estimativa do valor da rigidez dielétrica das amostras, o valor médio das cinco medições da tensão de ruptura de cada amostra.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

Este capítulo apresenta os resultados experimentais das medições de algumas propriedades das dispersões de nanopartículas de diamante e MWCNT em OTE, e os resultados numéricos do escoamento, promovido por convecção natural, no interior de cavidades com diferentes configurações. Serão apresentados inicialmente os resultados das medições das propriedades, na sequência, os resultados numéricos do escoamento no interior das cavidades. A avaliação das propriedades das dispersões de nanopartículas em OTE serviram como dados de entrada para as simulações do escoamento no interior das cavidades, que conforme já foi apresentado na modelagem física, tem duas configurações, denominadas configuração A e configuração B, nas formas bidimensional e tridimensional.

#### **4.1 Experimentais**

Foram medidas a condutividade térmica, a viscosidade dinâmica e a rigidez dielétrica das dispersões obtidas, sendo que, a metodologia utilizada para a medição destas propriedades já foi previamente apresentada. Na sequência, são apresentados os resultados das medições da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e rigidez dielétrica, com alguns comentários

sobre os resultados obtidos para cada uma destas propriedades.

#### 4.1.1 Condutividade térmica

As cinco medições da condutividade térmica para cada amostra analisada, juntamente com os valores médios e os desvios das medições em relação à média são mostrados na Tab. 4.1, com confiabilidade de 95,45%. Na última linha da Tab. 4.1 tem-se a condutividade térmica relativa,  $\kappa_r$ , que é a razão entre as condutividades térmicas das dispersões e a condutividade térmica do OTE.

Tabela 4.1: Resultados das medições de condutividade térmica das amostras.

Medidas condutividade térmica [W/m.K]							
Medida	OTE	ONT1	ONT2	ONT3	ODI1	ODI2	ODI3
1	0,16	0,18	0,19	0,19	0,17	0,18	0,19
2	0,16	0,17	0,18	0,21	0,18	0,18	0,19
3	0,16	0,17	0,19	0,19	0,17	0,18	0,19
4	0,15	0,18	0,18	0,21	0,19	0,17	0,19
5	0,16	0,18	0,18	0,19	0,17	0,19	0,19
média	0,158	0,176	0,184	0,198	0,176	0,180	0,190
Desvio padrão	0,009	0,011	0,011	0,022	0,018	0,014	0,000
$\kappa_r$ [—]	1	1,11	1,16	1,25	1,11	1,14	1,20

Visto que o desvio padrão máximo de todas as medições foi bastante baixo, 0,009 W/m.K, adotou-se como valor medido da condutividade térmica de cada amostra, os valores médios das cinco medições da condutividade térmica de cada amostra.

Como pode ser observado na Tab. 4.1, as dispersões de nanopartículas, tanto de diamante como de MWCNT em OTE, levaram a um aumento expressivo na condutividade térmica em relação à condutividade térmica do OTE, com incrementos máximos de 25% e 20 %, respectivamente para as amostras ONT3 e ODI3. Deve-se notar que tais incrementos na condutividade térmica foram obtidos para concentrações volumétricas baixas (concentração volumétrica máxima de 0,05 %). Tais resultados são consideravelmente elevados e superiores aos previstos pela equação de Maxwell (1873), da teoria do meio efetivo. Além disso, estes resultados se mostraram próximos aos resultados de Ettefaghi et al. (2013) e os de Xuan e Li (2000), conforme pode ser visto na Fig. 4.1. Nesta figura também são apresentados dados de Chiesa e Das (2009), Eastman et al. (1997) e Branson et al. (2013), obtidos para maiores concentrações volumétricas.

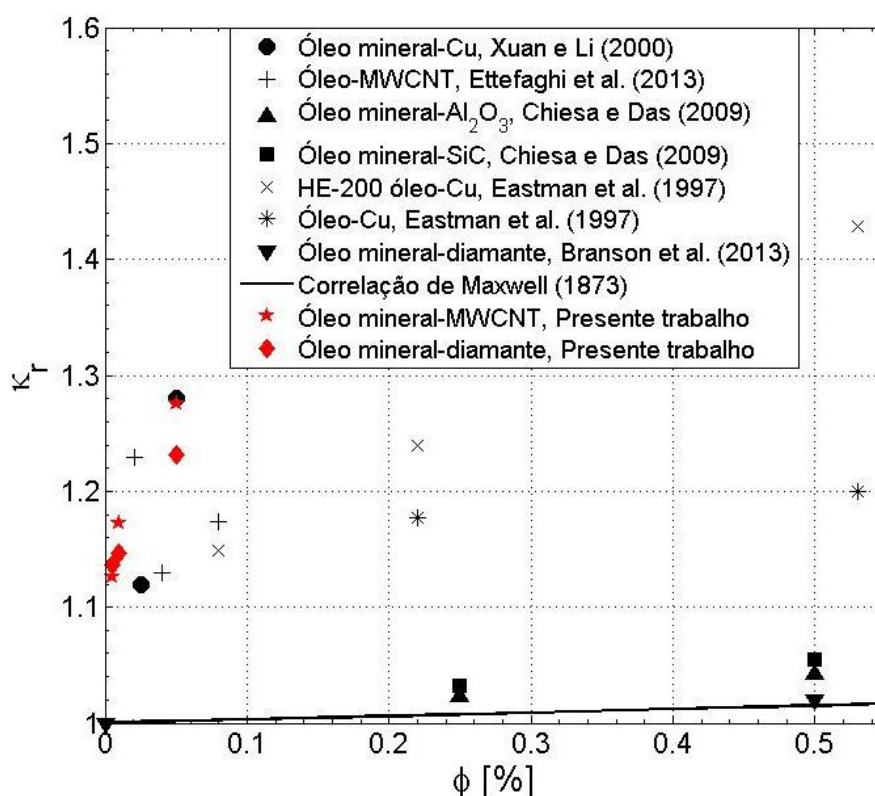


Figura 4.1 – Comparação dos incrementos na condutividade térmica com os obtidos por outros autores.



#### 4.1.2 Viscosidade dinâmica

Os resultados das medições do comportamento reológico das amostras podem ser vistos na Fig. 4.2, onde são apresentadas as tensões de cisalhamento,  $\tau$ , e as taxas de deformação,  $\gamma$ , às quais as amostras foram submetidas. Pode-se observar que, de todas as amostras, a única que apresentou comportamento não newtoniano, foi a amostra ONT3, onde a viscosidade apresentou uma forte dependência com a taxa de deformação, comportando-se como fluido pseudoplástico.

Na Fig. 4.2,  $\tau$ ,  $\gamma$  e  $\mu$ , representam, respectivamente, a tensão cisalhante no fluido, a taxa de deformação à qual o fluido é submetido e a viscosidade dinâmica do fluido.

Com as curvas do comportamento reológico das amostras foi possível obter as viscosidades das amostras (confiabilidade de 95,45%), exceto para a amostra ONT3, que apresentou viscosidade dependente da taxa de cisalhamento. Na Tab. 4.2 são apresentados os valores das medições da viscosidade das amostras das dispersões de nanopartículas em OTE e do OTE, sendo que, considerou-se o resultado da viscosidade como sendo a média de no mínimo dois testes do comportamento reológico. Conforme pode ser visto na Tab. 4.2, os desvios das medidas de viscosidade em relação à média foi bastante baixo, mostrando que os equipamentos utilizados, que foram calibrados, fornecem uma ótima repetibilidade.

A utilização de nanopartículas em OTE, em todos os casos, resultou em incrementos na viscosidade do OTE, com incrementos máximos de 25% para as amostras ONT2 e ODI3 e um incremento mínimo de 3% para a amostra ODI2. Ao contrário do que se esperava, o incremento da viscosidade para a amostra ODI1 foi maior que o incremento da viscosidade para a amostra ODI2. Este resultado foi comprovado por uma verificação das amostras e repetição dos testes do comportamento reológico destas duas amostras.

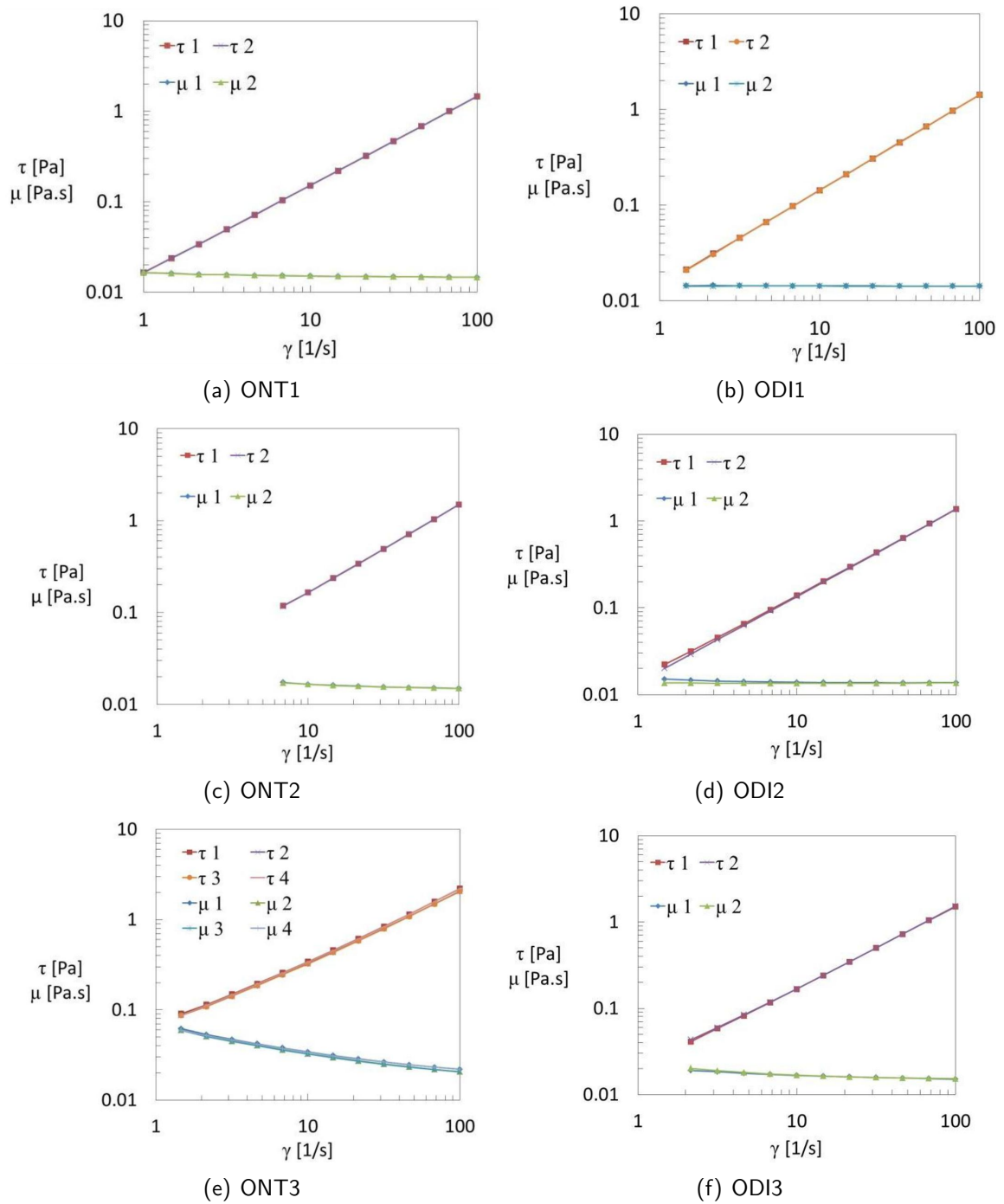


Figura 4.2 – Comportamento reológico das dispersões de nanopartículas em OTE.

Tabela 4.2: Resultados das medições de viscosidade dinâmica das amostras.

Viscosidade média de cada amostra [Pa.s]							
Medida	OTE	ONT1	ONT2	ONT3	ODI1	ODI2	ODI3
1	0,01334	0,01521	0,01692	$\mu(\gamma)$	0,01432	0,01403	0,01664
2	0,01336	0,01522	0,01630	$\mu(\gamma)$	0,01431	0,01354	0,01686
3	—	—	0,01673	$\mu(\gamma)$	—	—	—
4	—	—	—	$\mu(\gamma)$	—	—	—
Média	0,01335	0,01521	0,01665	$\mu(\gamma)$	0,01431	0,01378	0,01675
Desvio Padrão	1,8E-05	1,9E-05	6,3E-04	—	1,7E-05	7,1E-04	3,2E-04
$\mu_r$ [-]	1	1,14	1,25	—	1,07	1,03	1,25

#### 4.1.3 Rigidez dielétrica

Os resultados das medições da rigidez dielétrica das amostras estão apresentados na Tab. 4.3. O resultado da rigidez dielétrica de cada amostra foi obtido pela média de cinco medições da rigidez dielétrica (com confiabilidade de 95,45% das medições), que seguiu a metodologia já apresentada no capítulo anterior, capítulo 3.

Tabela 4.3: Resultados das medições de rigidez dielétrica das amostras.

Medida	Rigidez Dielétrica [kV]						
	OTE	ODI1	ODI2	ODI3	ONT1	ONT2	ONT3
1	23,9	13,0	10,3	6,2	7,9	6,0	1,4
2	24,8	15,2	10,3	6,4	6,8	5,3	1,3
3	23,4	16,3	9,2	6,3	6,6	4,8	1,3
4	28,7	12,6	9,2	6,0	6,6	6,3	1,2
5	25,6	16,0	9,5	6,8	7,2	7,5	1,3
Média	25,28	14,62	9,70	6,34	7,02	5,98	1,30
Desvio Padrão	4,18	3,43	1,12	0,59	1,10	2,07	0,14

Conforme pode ser visto na Fig. 4.3, a utilização das nanopartículas de diamante e MWCNT em OTE resultou em uma redução na rigidez dielétrica do OTE, sendo que, as dispersões de nanopartículas de MWCNT em OTE apresentaram uma redução na rigidez dielétrica maior que as dispersões de nanopartículas de diamante. Esta diferença pode estar associada ao fato do diamante ser um material não condutor elétrico, enquanto que, os nanotubos de carbono podem ser considerados, dependendo do arranjo da estrutura dos átomos, semi-condutores elétricos, conforme Da Fonseca (2011). Além disso, as duas dispersões apresentaram comportamento similar na redução da rigidez dielétrica com a concentração volumétrica, apresentando uma taxa de redução na rigidez dielétrica acentuada para baixas concentrações volumétrica e uma taxa de redução na rigidez dielétrica menor para concentrações volumétricas altas.

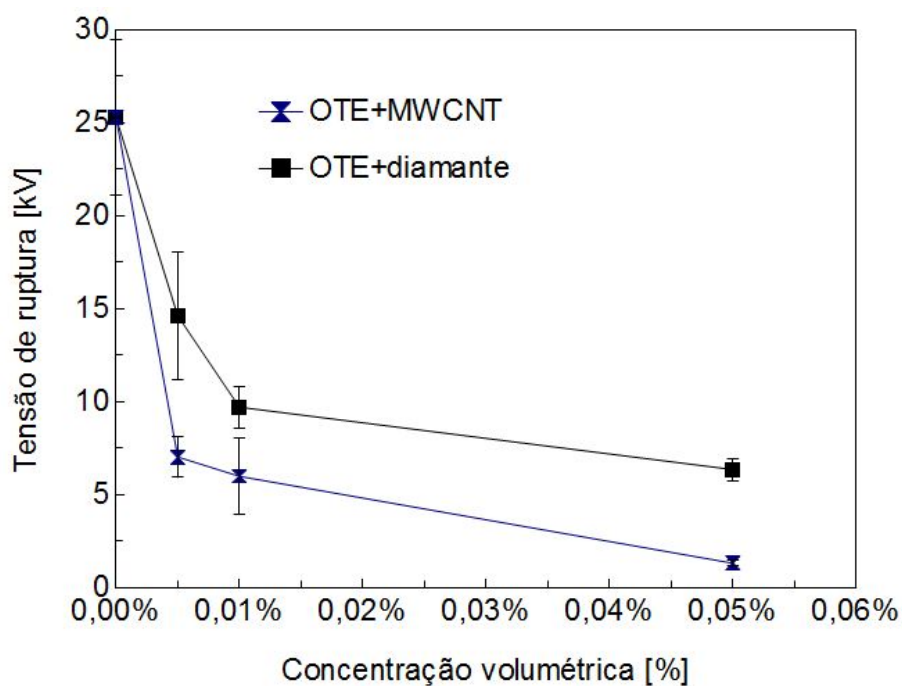


Figura 4.3 – Rigidez dielétrica das dispersões de nanopartículas em OTE.

Antes de tratar dos resultados numéricos na Tab. 4.4 são sumarizados os valores das propriedades que foram utilizadas para obter o número de Prandtl. Os números de Prandtl das amostras, que também são apresentado nesta tabela, foram utilizados nas simulações.

Tabela 4.4: Propriedades físicas das amostras, utilizadas para as simulações.

Amostra	$\rho$	$c_p$	$\kappa$	$\mu$	$Pr$
OTE	861,43	2500	0,158	0,013350	211,23
ONT1	861,50	2499,75	0,176	0,015215	216,10
ONT2	861,56	2499,50	0,184	0,016650	226,18
ODI1	861,57	2499,62	0,176	0,014314	203,29
ODI2	861,70	2499,24	0,180	0,013785	191,40
ODI3	862,76	2496,19	0,190	0,016752	220,09

## 4.2 Numéricos

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos das simulações bidimensionais e tridimensionais do escoamento das dispersões de nanopartículas em OTE para as configurações A e B e para diferentes números de Grashof. Previamente, foram realizados os procedimentos de verificação e validação do código numérico bidimensional, que também são apresentados nesta seção. O código numérico tridimensional já havia sido verificado e validado, com resultados relevantes já publicados (PADILLA; LOURENÇO; SILVEIRA NETO, 2013), e por isso, para o código 3D tais processos não são apresentadas neste trabalho.

A verificação, validação e as simulações numéricas dos casos de interesse deste trabalho foram realizadas em dois computadores, ambos com processador Intel® Core™ i7-3770 com quatro núcleos e velocidade de 3,40 GHz, sendo que, o tempo de simulação dos casos analisados variou em cada caso, com tempo máximo em torno de 40 dias e tempo mínimo em torno de um dia. Os menores tempos de simulação foram alcançados devido à estratégia de utilizar os resultados obtidos das primeiras simulações (com números de Grashof menores) nas simulações subsequentes (com números de Grashof maiores). Os tempos adimensionais para alcançar regime permanente dos escoamentos nas configurações A e B variou em cada caso, de 8 a 43, sendo que, o passo de tempo era da ordem de  $10^{-6}$ .

### 4.2.1 Verificação

O processo de verificação consiste em um estudo que visa garantir que as equações representativas de um problema físico estão sendo resolvidas corretamente, garantindo a ausência de erros na implementação e no algoritmo (MOREIRA, 2011). Este processo, no entanto, é somente um artifício matemático que não representa que a metodologia utilizada seja correta para resolver um problema específico.

A verificação do código bidimensional foi realizada utilizando a solução manufaturada dos vórtices de Taylor-Green (TAYLOR; GREEN, 1937), que tem solução analítica do campo de velocidade para um domínio bidimensional  $x \in [0, 2\pi]$  e  $y \in [0, 2\pi]$  dada pela Eq. (4.1) e Eq. (4.2). Por se tratar de uma solução manufaturada não é realizada a solução do escoamento de um fluido específico. A solução manufaturada é, somente, uma função de campo analítica, que é diferenciável, de modo a atender a equação de balanço de quantidade de movimento, cuja solução analítica pode, então, ser comparada com a resposta numérica, com efeitos de verificação da implementação do código numérico.

$$u(x, y) = \text{sen}(x)\cos(y)F(t), \quad (4.1)$$

$$v(x, y) = -\cos(x)\text{sen}(y)F(t), \quad (4.2)$$

onde:

$$F(t) = e^{-2\nu t}. \quad (4.3)$$

O código numérico foi utilizado para resolver o campo de velocidade apenas com a imposição das condições de contorno da solução analítica. A solução manufaturada dos vórtices de Taylor-Green satisfaz o balanço de quantidade de movimento e o balanço de massa, de tal modo que, para esta solução manufatura o termo fonte associado na solução das equações de balanço de quantidade de movimento, que surge em outras soluções manufaturadas, não aparece.

Com a solução numérica obtida por meio do código numérico e a solução analítica foi

possível comparar os resultados de forma adequada, determinando a acurácia do código com as dimensões da malha. A norma  $L_2$ , Eq. (4.4), foi utilizada para avaliar o erro entre a solução numérica, obtida pelo código, e a solução analítica, com o aumento das dimensões da malha utilizada.

$$L_2 = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [\varphi^n(x_i, y_j, t) - \varphi^a(x_i, y_j, t)]^2}, \quad (4.4)$$

onde,  $\varphi$  representa a variável a ser comparada, que pode ser a componente  $x$  ou a componente  $y$  de velocidade,  $N_x$  e  $N_y$  indicam os números de volumes na direção  $x$  e direção  $y$ , respectivamente.

Na Fig. 4.4 são mostradas as componentes de velocidade obtidas pelo código numérico e na Fig. 4.5 é mostrada a estimativa do erro entre a solução numérica e a solução analítica, utilizando a norma  $L_2$ , onde é apresentada, junto às curvas de erros, uma curva de referência com decaimento de segunda ordem, sendo possível constatar que o código apresenta uma acurácia de segunda ordem, que é devido aos esquemas de interpolação espacial e métodos de integração numérica utilizados.

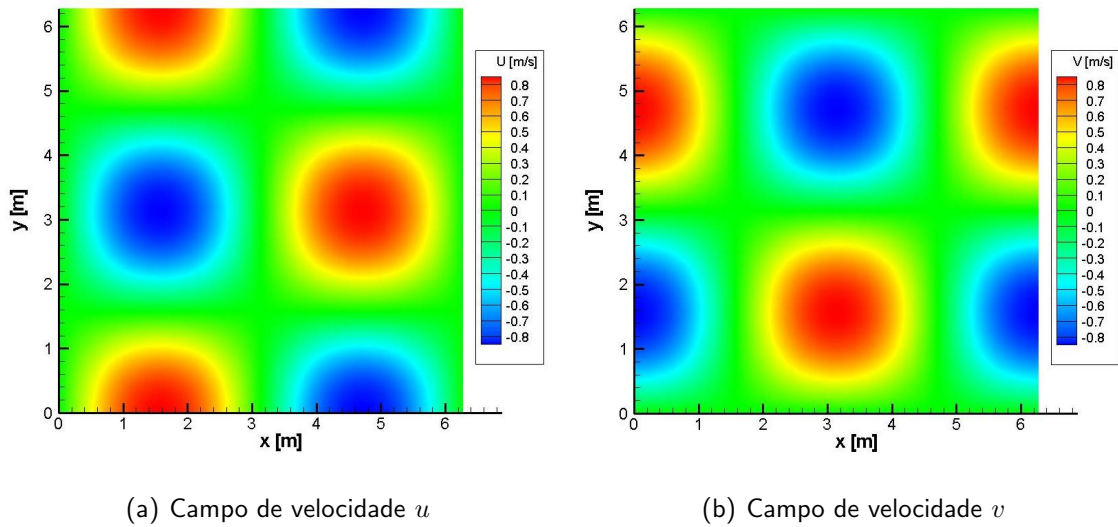


Figura 4.4 – Campos de velocidade dos vórtices de Taylor e Green (1937).



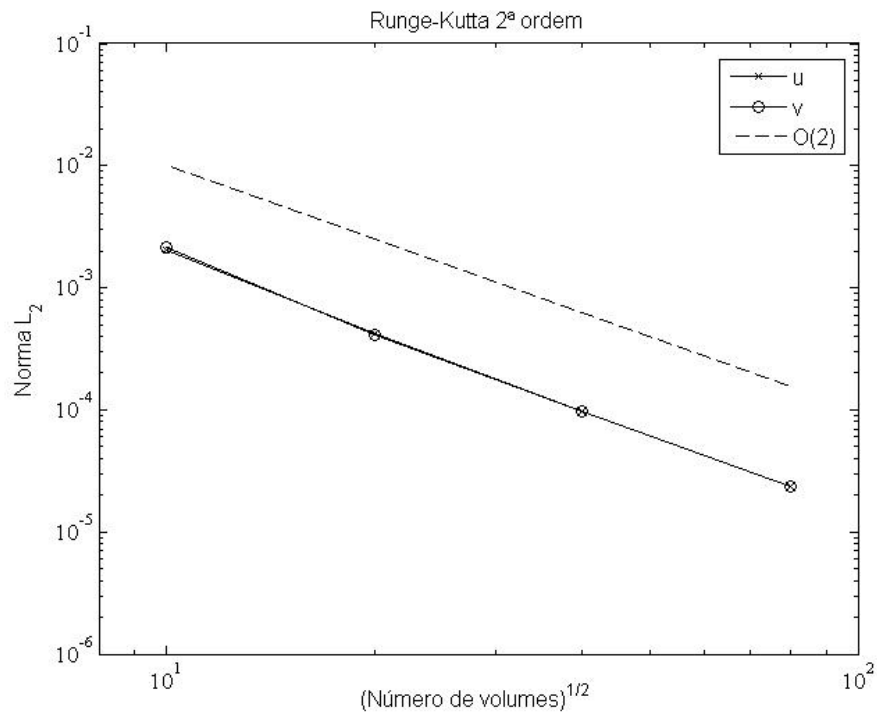


Figura 4.5 – Avaliação do erro, por meio da norma  $L_2$ , comparada a um decaimento de segunda ordem.

Como pôde ser visto acima, o código numérico bidimensional foi verificado, ou seja, o código foi implementado adequadamente, de tal modo que as equações representativas estão sendo resolvidas corretamente.

#### 4.2.2 Validação

O processo de validação de um código consiste na comparação dos resultados obtidos por meio do código computacional com uma solução de referência, que pode ser analítica numérica ou experimental. Este processo é de suma importância, pois os resultados numéricos obtidos por meio do código são validados com resultados de referência de um problema físico específico, garantindo a adequabilidade da modelagem física utilizada na implementação do código.

Para a validação do código numérico bidimensional foram resolvidos dois problemas que

apresentam resultados de referência, a saber, o escoamento em cavidade quadrada com tampa deslizante e o escoamento promovido por convecção natural.

O escoamento em cavidade quadrada com tampa deslizante é um problema classicamente utilizado na validação de códigos bidimensionais e para este problema os resultados de referências foram obtidos de Ghia, Ghia e Shin (1982), que utilizaram um método multigrid para a solução das equações de Navier-Stokes. Os detalhes da modelagem física e matemática deste problema, que podem ser vistas em Ghia, Ghia e Shin (1982), não serão apresentados neste trabalho por ser um problema amplamente utilizado para a realização da validação de códigos para solução de escoamentos bidimensionais.

Na Fig. 4.6 são apresentados os perfis das componentes de velocidade em seções médias da cavidade para  $Re=100$  para diversas malhas utilizadas. Na Fig. 4.7 são mostrados outros perfis das componentes da velocidade nas mesmas seções médias, neste caso para  $Re=400$ . Tanto para  $Re=100$  quanto para  $Re=400$ , pode-se ver que para uma malha de  $129 \times 129$  os resultados numéricos obtidos pelo código mostraram-se independentes da malha e apresentaram ótima concordância com os resultados de referência.

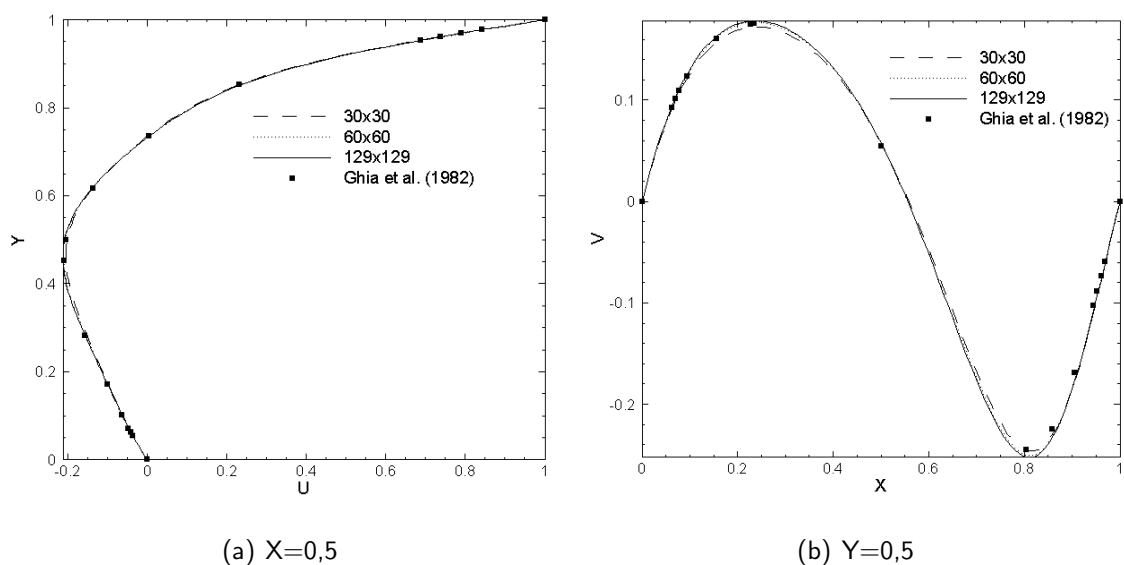


Figura 4.6 – Perfis de velocidade em seções médias da cavidade com tampa deslizante,  $Re=100$ .

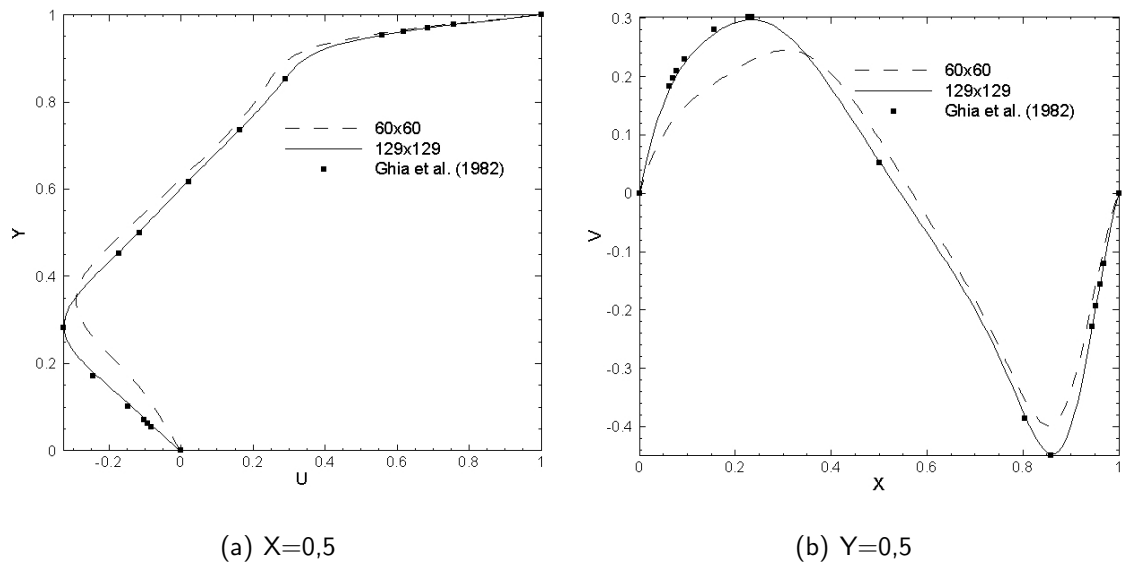


Figura 4.7 – Perfis de velocidade em seções médias da cavidade com tampa deslizante,  $Re=400$ .

Tabela 4.5: Comparação dos resultados de convecção natural do presente trabalho com os de outros autores,  $Pr=0,7$ .

Rayleigh	Variáveis	Autores				
		Presente Trabalho	Davis (1983)	Barakos, Mitsoulis e Assimacopoulos (1994)	Fusegi, Hyun e Kuwahara (1991)	Khanafer, Vafai e Lightstone (2003)
$10^3$	Nu	1,118	1,118	1,114	1,105	1,118
	V máx. (em $x/H$ )	0,140 (0,1774)	0,138 (0,178)	0,155 (0,181)	0,131 (0,200)	0,139 (0,173)
	U máx. (em $y/H$ )	0,138 (0,8104)	0,136 (0,813)	0,153 (0,806)	0,132 (0,833)	0,137 (0,812)
$10^4$	Nu	2,248	2,243	2,245	2,230	2,245
	V máx. (em $x/H$ )	0,234 (0,1139) (0,1139)	0,234 (0,119)	0,234 (0,119)	0,225 (0,117)	0,233 (0,123)
	U máx. (em $y/H$ )	0,193 (0,8227)	0,192 (0,823)	0,193 (0,818)	0,201 (0,817)	0,192 (0,827)
	Nu	4,545	4,520	4,510	4,646	4,522

*Continua na página seguinte*

Rayleigh	Variáveis	Autores				
		Presente Trabalho	Davis (1983)	Barakos, Mitsoulis e Assimacopoulos (1994)	Fusegi, Hyun e Kuwahara (1991)	Khanafer, Vafai e Lightstone (2003)
$10^5$	V máx. (em $x/H$ )	0,258 (0,0633)	0,261 (0,066)	0,258 (0,066)	0,247 (0,065)	0,258 (0,065)
	U máx. (em $y/H$ )	0,131 (0,8607)	0,153 (0,855)	0,132 (0,859)	0,147 (0,855)	0,131 (0,854)

Para o problema do escoamento promovido por convecção natural em cavidade, as condições de contorno de temperatura são: uma das paredes laterais com temperatura alta e a outra com temperatura baixa, paredes superior e inferior adiabáticas. Estas condições de contorno são similares às condições de contorno da configuração A que será analisada neste trabalho. Como hipóteses simplificadoras para o problema deve-se destacar que a massa específica foi tomada como constante, exceto para o termo peso-empuxo, onde é utilizada a aproximação de Boussinesq. Foram simulados casos para número de Rayleigh variando de  $10^3$  a  $10^5$  e  $Pr=0,7$ , sendo que, a malha que apresentou resultado independente para esta validação foi uma malha de  $80 \times 80$ . Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados de referência de Davis (1983), Barakos, Mitsoulis e Assimacopoulos (1994), Fusegi, Hyun e Kuwahara (1991) e Khanafer, Vafai e Lightstone (2003). Esta comparação apresentou bastante concordância, como pode ser visto na Tab. 4.5, que mostra os valores máximos de velocidade na cavidade com as posições em que estas velocidades máximas ocorrem e os valores do Nusselt médio,  $Nu$ , para cada Rayleigh simulado. No trabalho de Fontes, Padilla e Bandarra Filho (2013) são encontrados maiores detalhes da validação do código bidimensional para o caso de convecção natural em cavidade quadrada.

Com as comparações apresentadas, o código numérico foi devidamente validado, portanto, é uma ferramenta confiável para realizar as simulações de escoamentos promovidos por convecção natural no interior de cavidades, utilizando as propriedades das dispersões de

nanopartículas em OTE.

#### 4.2.3 *Independência de malha*

Com o objetivo de obter resultados numéricos independentes do refinamento da malha, foram realizadas comparações dos resultados em termos dos perfis de velocidade, em regiões específicas, e do número de Nusselt médio.

Para a forma bidimensional foram feitos testes de malha das configurações A e B a partir de uma malha grosseira até uma malha mais refinada. Esta malha apresentou resultados nos perfis de velocidade praticamente invariáveis e desvio relativo no número de Nusselt médio menor que 3%, comparados com os resultados da malha imediatamente mais grosseira. Para tanto, os testes foram feitos próximos das condições de altos números de Grashof, onde os efeitos advectivos são mais representativos. Assim, foram escolhidas para os testes de independência de malha, as condições de  $Gr=10^6$  e  $Gr=10^3$ , respectivamente para a configuração A e para a configuração B, ambos utilizando as propriedades do OTE para o cálculo do Prandtl.

Na Fig. 4.8 podem ser vistos os perfis de velocidade, em seções médias da cavidade na configuração A, para diferentes refinamentos de malha. Pode-se observar que as malhas de 70x70 e 80x80 apresentaram perfis de velocidade bastante próximos. Ao se compararem os resultados destas malhas em relação ao número de Nusselt médio, obteve-se um desvio relativo, com base na malha mais refinada, de 2,27%, que é menor que o critério adotado, 3%. Fazendo uma escolha conservadora para a quantidade de volumes da malha a ser utilizada nas simulações, a malha de 80x80 foi adotada. Vale destacar que todas as malhas utilizadas no teste de independência de malha apresentavam refinamento localizado nas paredes, com taxa de crescimento de 5% dos volumes no sentido das paredes para o centro da cavidade, conforme Fig. 4.9.

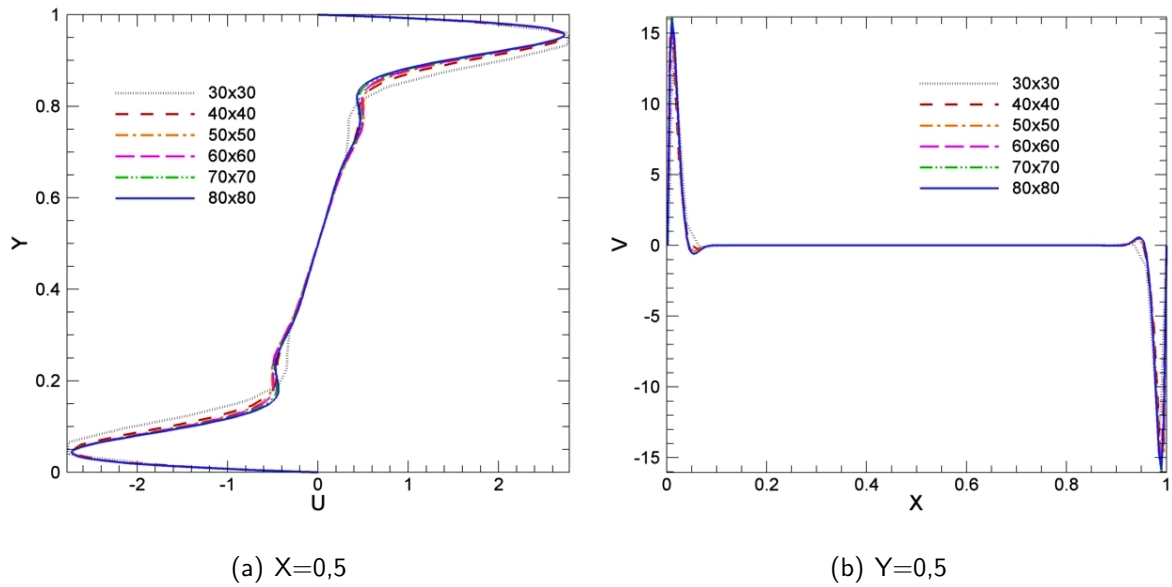


Figura 4.8 – Perfis de velocidade ao longo de linhas médias da cavidade, configuração A, forma 2D,  $Gr=10^6$ .

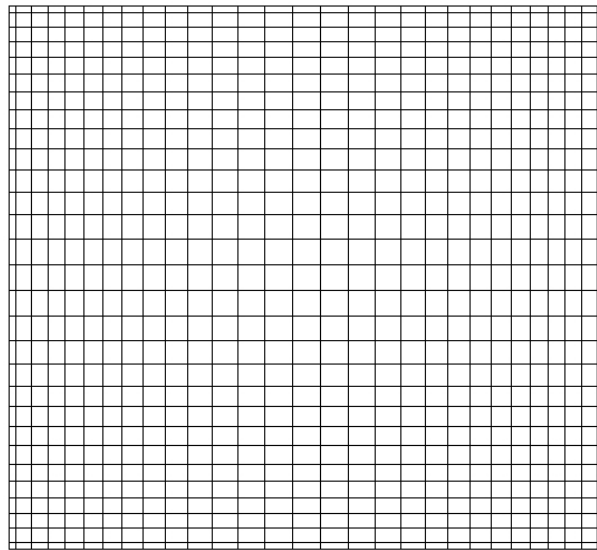


Figura 4.9 – Refinamento na região da parede, com taxa de crescimento de 5% dos volumes, malha 30x30.

Utilizando o mesmo critério para a configuração B na forma bidimensional, tem-se na Fig. 4.10, o perfil da componente de velocidade  $V$  na seção  $X=0.5$ . É possível observar que, a partir da malha 32x32 há pouca variação no perfil da componente  $V$ . Foram escolhidas as duas malhas mais refinadas para comparar o desvio relativo do número de Nusselt médio.

Este desvio, com base na malha mais refinada, foi de 0,84%, que é bem menor que 3%, e portanto, fazendo-se novamente uma escolha conservadora, a malha de 80x80 foi escolhida para as simulações, que neste caso (configuração B) é uma malha regular.

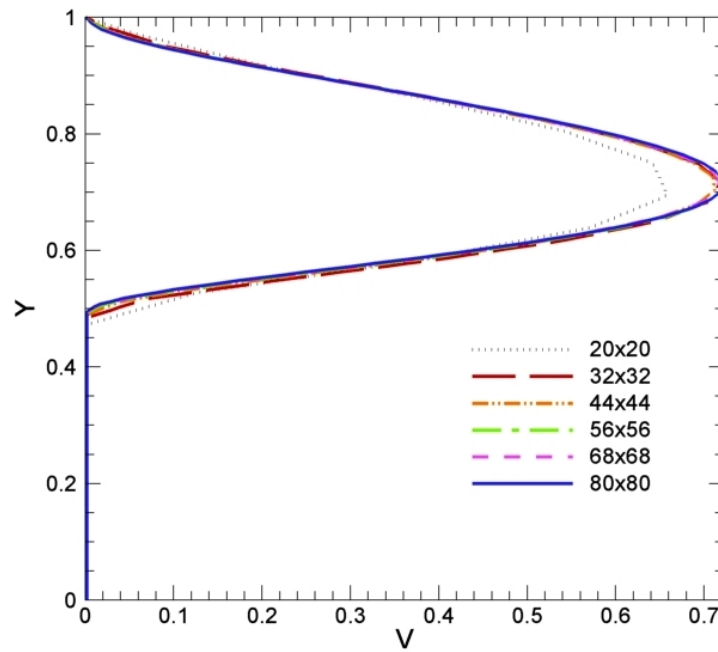


Figura 4.10 – Perfil da componente de velocidade  $V$  ao longo da linha  $X=0,5$ , configuração B, forma 2D,  $Gr=10^3$ .

Para a forma tridimensional, os mesmos critérios e condições foram adotados para escolha da malha com resultado independente do refinamento, ainda que, estes resultados tiveram por objetivo somente uma análise qualitativa. Assim, podem ser vistos na Fig. 4.11 os perfis de velocidade das malhas testadas em  $X=0,5$  e  $Y=0,5$ , ambos de uma seção  $Z=0,5$ , onde esperava-se que os resultados fossem próximos aos resultados da forma bidimensional, para a configuração A.

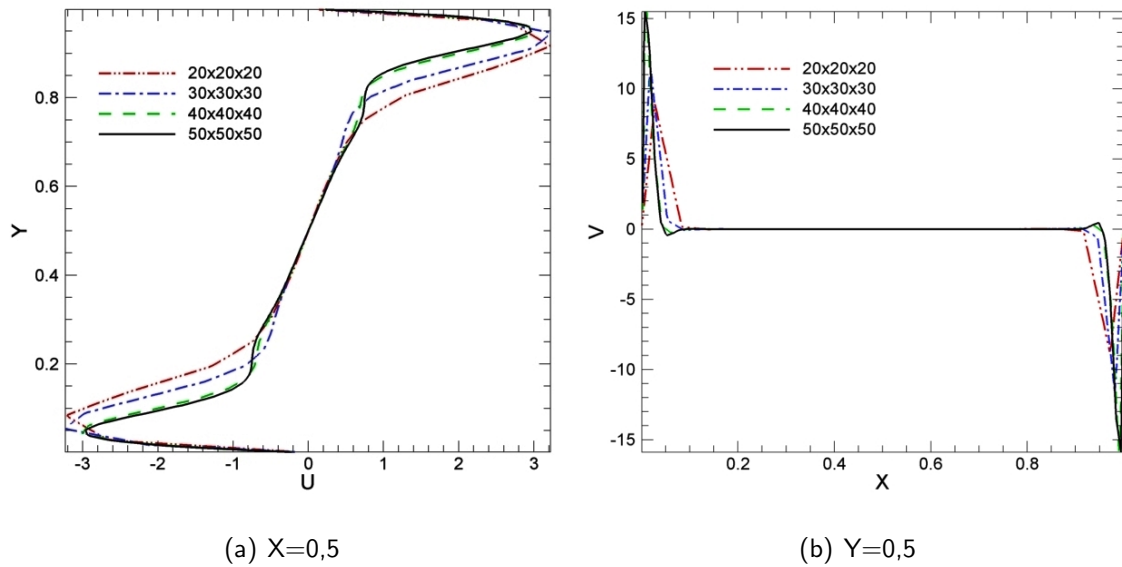


Figura 4.11 – Perfis de velocidade ao longo de linhas médias da cavidade em  $Z=0,5$ , configuração A, forma 3D.

Como pode ser visto na Fig. 4.11 as duas últimas malhas apresentaram perfis bastante próximos. Quando foram avaliados os valores do número de Nusselt médio para estas malhas, o desvio foi de 0,47%, bem menor que 3%. Portanto, utilizando um critério conservador, a malha de 50x50x50, que também apresentava um refinamento de 5% nas paredes, foi adotada como malha com resultado independente.

Os perfis de velocidade da configuração B em  $X=0,5$  e em  $Y=0,8$ , ambos localizados no plano  $Z=0,5$ , são mostrados na Fig. 4.12. É possível observar que as malhas 30x30x30 e 42x42x42 ainda não tinham apresentado perfis coincidentes. Ainda assim, devido ao tempo necessário para a simulação de malhas mais refinadas (tempos maiores que dois meses) e ao fato destes resultados terem a finalidade de uma análise qualitativa, o processo de teste de malha se encerrou na malha 42x42x42. Na comparação do número de Nusselt ponderado, a diferença entre as malhas 30x30x30 e 42x42x42 foi de 4,46%, que apesar de ser maior que o critério adotado não é uma diferença tão grande, haja visto o propósito destes resultados. Portanto, os resultados para o caso tridimensional na configuração B é de uma malha de 42x42x42.



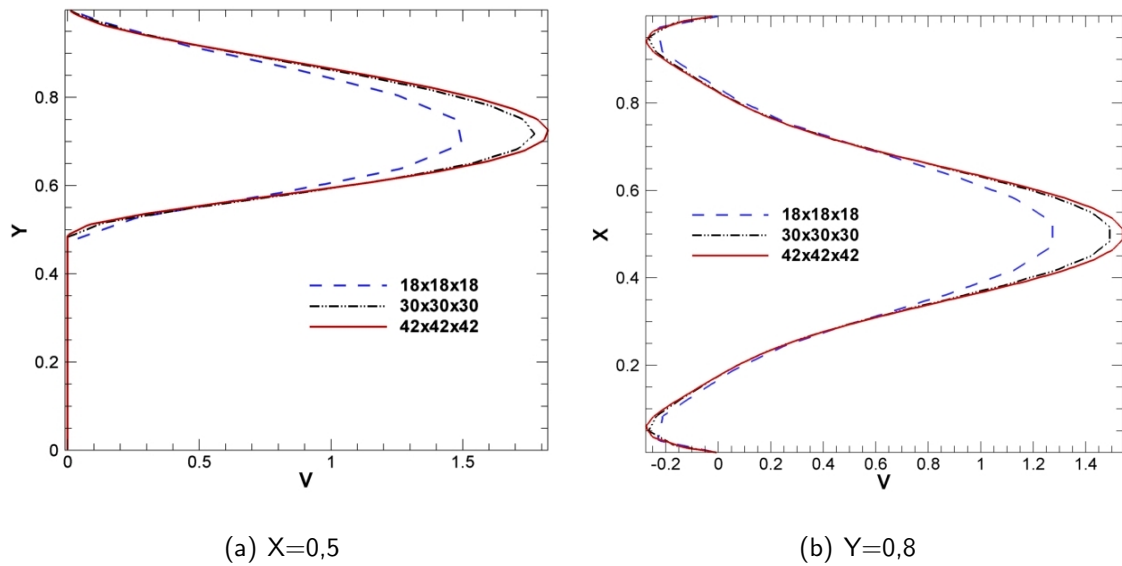


Figura 4.12 – Perfis de velocidade ao longo de linhas em  $X=0,5$  e  $Y=0,8$  da cavidade no plano em  $Z=0,5$ , configuração B, forma 3D.

Na sequência são apresentados os resultados das simulações numéricas, dos escoamentos bidimensionais (de todas as amostras) e tridimensionais (somente do OTE) nas configurações A e B.

#### 4.2.4 Solução numérica bidimensional

Os resultados da solução numérica dos escoamentos de OTE e das dispersões baseadas no mesmo, tanto para os casos bidimensionais como para os casos tridimensionais, foram obtidos para regime permanente. Esta condição foi considerada alcançada quando as médias ponderadas, baseadas nas superfícies resfriadas e aquecidas, dos números de Nusselt das superfícies aquecidas e das superfícies resfriadas apresentaram um desvio menor que 0,5%. Assim, são apresentados na sequência, os campos de temperatura do OTE, juntamente com as linhas de corrente para  $Gr=10^3$ - $10^6$ , da configuração A, Fig. 4.13; e para  $Gr=10^1$ - $10^4$ , da configuração B, Fig. 4.14. Os campos de temperatura e de velocidade das dispersões não são apresentados, visto que, as diferenças nos mesmos, em relação aos campos de temperatura e velocidade do escoamento de OTE, são inobserváveis nesta forma de apresentação.

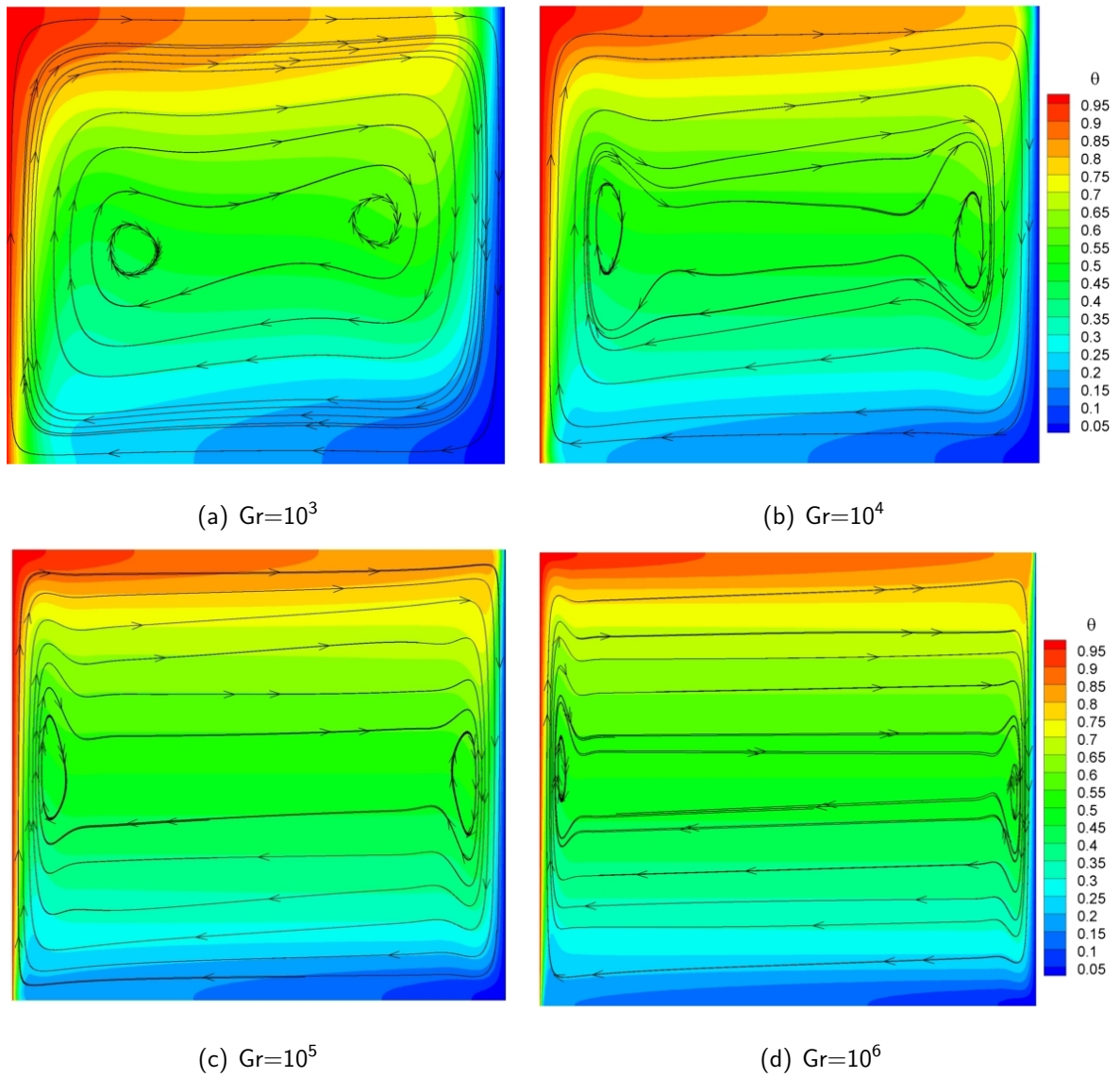


Figura 4.13 – Campos de temperatura e linhas de corrente do escoamento do OTE no interior da cavidade, configuração A.

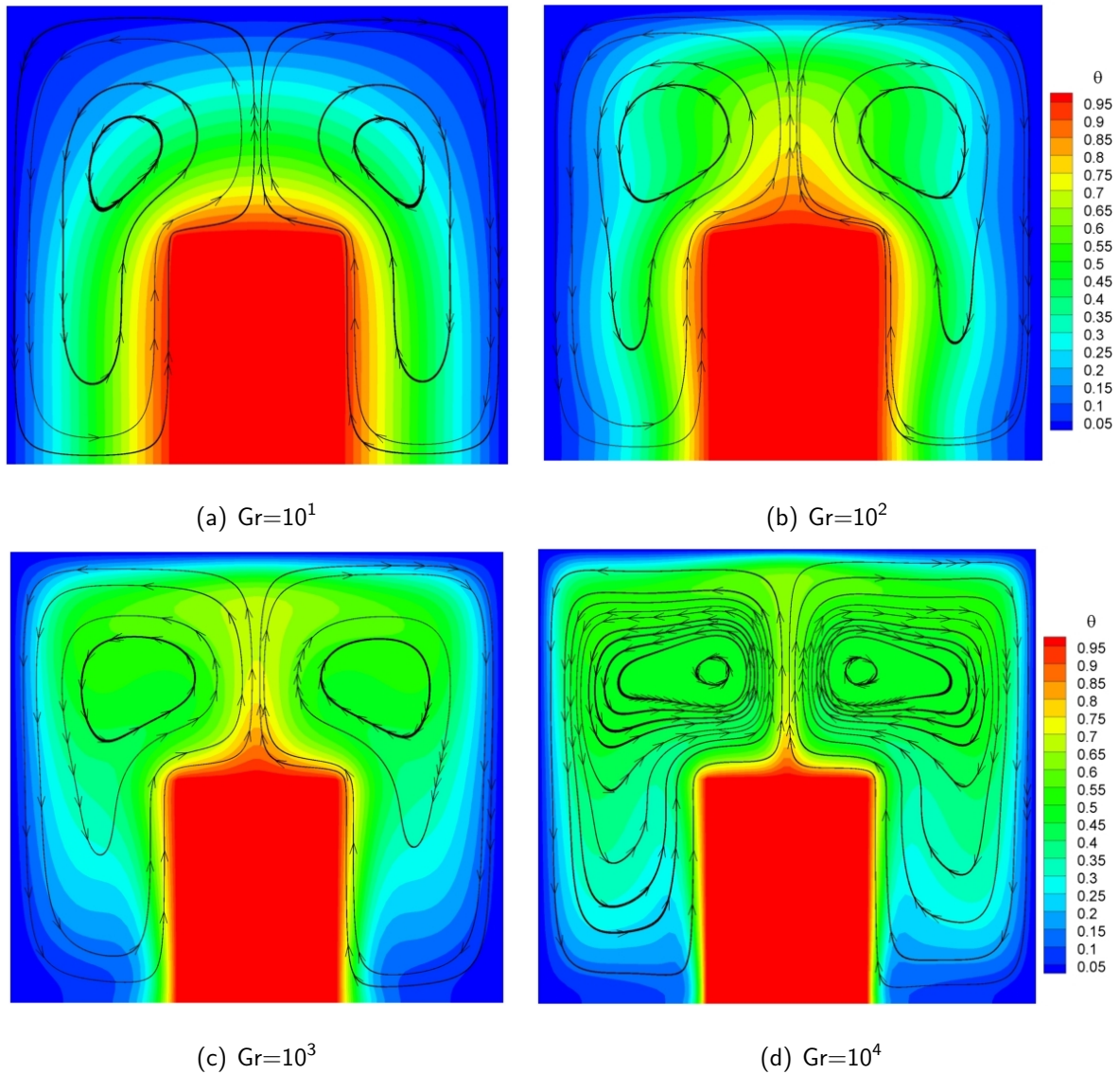


Figura 4.14 – Campos de temperatura do OTE no interior da cavidade, configuração B.

Como pode ser observado na Fig. 4.13, para todos os números de Grashof do escoamento, existe a presença de um vórtice primário e dois vórtices secundários, sendo que os vórtices secundários são alongadas na vertical e posicionadas nas laterais da cavidade. Com o aumento no número de Grashof os vórtices secundários se aproximaram das paredes verticais e apresentaram um alongamento mais pronunciado. No campo de temperatura, podem-se observar maiores gradientes de temperatura nas paredes verticais, indicando um aumento na transferência de calor entre as superfícies. Além disso, é notório que as regiões aquecidas e resfriadas do fluido, provenientes das paredes verticais, são carregadas ao longo das

paredes adiabáticas (paredes horizontais), sendo este carregamento mais intenso para maiores números de Grashof, de tal forma que é possível observar regiões aquecidas que foram levadas pelo o escoamento às proximidades da superfície resfriada. Analogamente, é observado o carregamento de regiões resfriadas às proximidades da superfície aquecida.

Na Fig. 4.14, o escoamento apresenta um par de vórtices primários envolventes que contornam as superfícies do núcleo, continuam na região da pluma térmica e retornam contornando as paredes da cavidade. É observado que, para  $Gr=10^1$  a transferência de calor é predominantemente por difusão, não sendo observado o carregamento da temperatura pelo campo de velocidade. Enquanto que, a partir de  $Gr=10^2$  é possível verificar efeitos advectivos, por meio da formação de uma pluma térmica, a partir da superfície superior do núcleo aquecido. Estes efeitos advectivos são mais acentuados com o aumento do número de Grashof, o que levou a uma melhor homogeneização da temperatura no interior da cavidade e a uma elevação nos gradientes de temperatura nas superfícies da cavidade, incrementando assim, a transferência da energia térmica do núcleo aquecido para as paredes resfriadas.

A partir da solução dos campos de velocidade e temperatura do OTE e das dispersões de nanopartículas em OTE, foi possível determinar também os números de Nusselt, para cada condição do escoamento (número de Grashof), em função da concentração volumétrica, conforme pode ser visto nas Fig. 4.15 e Fig. 4.16, respectivamente para a configuração A e configuração B. Para tanto, no caso da configuração A, o número de Nusselt foi calculado como sendo a média aritmética do número de Nusselt da superfície aquecida e do número de Nusselt da superfície resfriada. No caso da configuração B, os números de Nusselt apresentados são os da superfície aquecida. Estes valores, quando realizadas as médias ponderadas, são iguais aos valores dos números de Nusselt da superfície resfriada, com possíveis desvios devido ao critério de parada adotado para consideração de regime permanente.

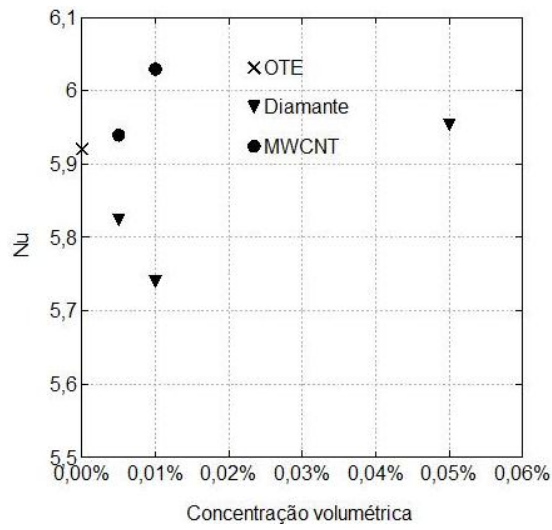
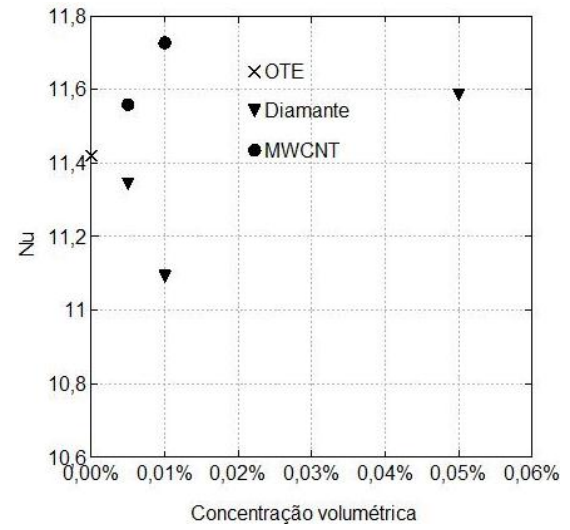
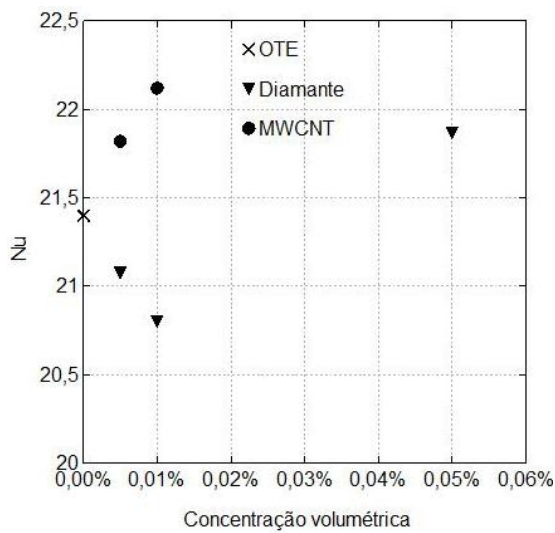
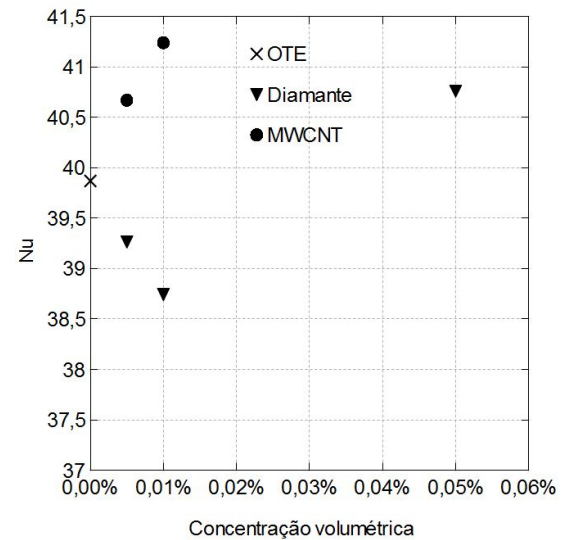
(a)  $Gr=10^3$ (b)  $Gr=10^4$ (c)  $Gr=10^5$ (d)  $Gr=10^6$ 

Figura 4.15 – Números de Nusselt em função da concentração volumétrica, configuração A.

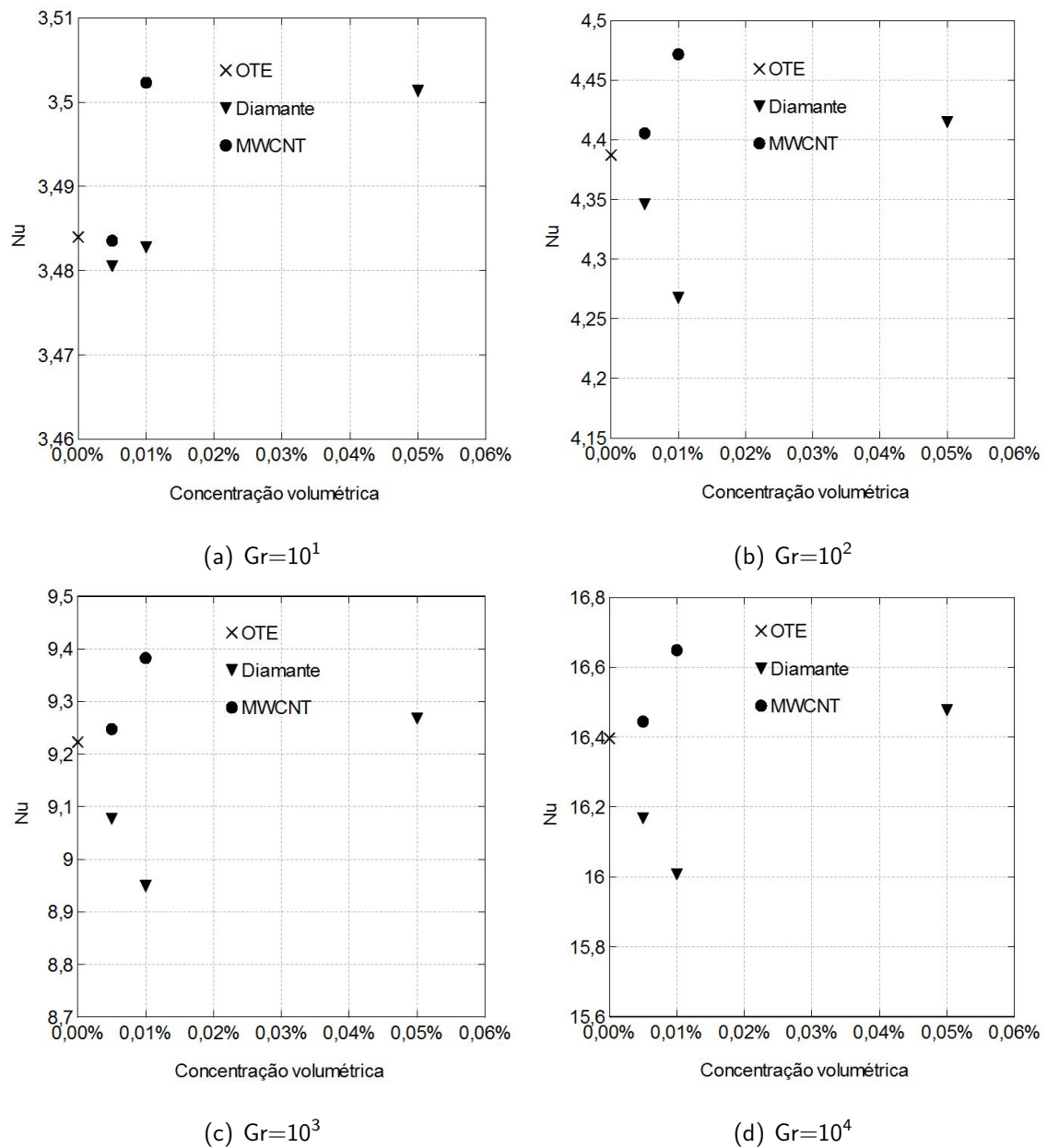


Figura 4.16 – Números de Nusselt em função da concentração volumétrica, configuração B.

Como pode ser visto nas Fig. 4.15 e 4.16, as diferenças nos números de Nusselt das dispersões em relação ao número de Nusselt do OTE foram pequenas, sendo que, as dispersões que apresentaram incremento no  $Nu$ , em relação ao  $Nu$  do OTE, foram as que tinham número de Prandtl maior que o do OTE. Da mesma forma, as dispersões que apresentaram redução no número de Nusselt, em relação ao número de Nusselt do OTE, foram as que apresentaram uma diminuição no número de Prandtl, em relação ao número de Prandtl do OTE.

As dispersões que apresentaram aumento no número de Prandtl foram as amostras ONT1, ONT2 e ODI3, com números de Prandtl, respectivamente, 216,1, 226,2 e 220,1, frente a 211,23, que é o número de Prandtl do OTE. Esta influência do número de Prandtl não se mostrou tão evidente para o escoamento na configuração B, com  $Gr=10^1$ . Neste caso, a transferência de calor se dá, praticamente, por difusão, e as diferenças entre os números de Nusselt das amostras foi influenciada pelo critério de parada adotado (máximo de 0,5%) entre os números de Nusselt das superfícies aquecidas e resfriadas.

Os resultados numéricos obtidos estão concordantes com o que se esperava da relação entre  $Nu$ ,  $Gr$  e  $Pr$ , conforme comparação destes resultados, para o escoamento na configuração A, com a correlação numérica de Berkovsky e Polevikov (SPALDING; AFGAN, 1977), que mostra uma relação direta do número de Nusselt com os números de Prandtl e de Grashof, Eq. 4.5.

$$Nu = 0,18 \cdot \left( \frac{Ra \cdot Pr}{0,2 + Pr} \right)^{0,29} \quad (4.5)$$

Onde,  $10^{-3} \leq Pr \leq 10^5$ ,  $10^3 \leq Ra \cdot Pr / (0,2 + Pr)$ .

Ao comparar-se os resultados desta correlação com os resultados numéricos deste trabalho, os desvios ficaram dentro de  $\pm 15\%$ , conforme pode ser visto na Fig. 4.17.



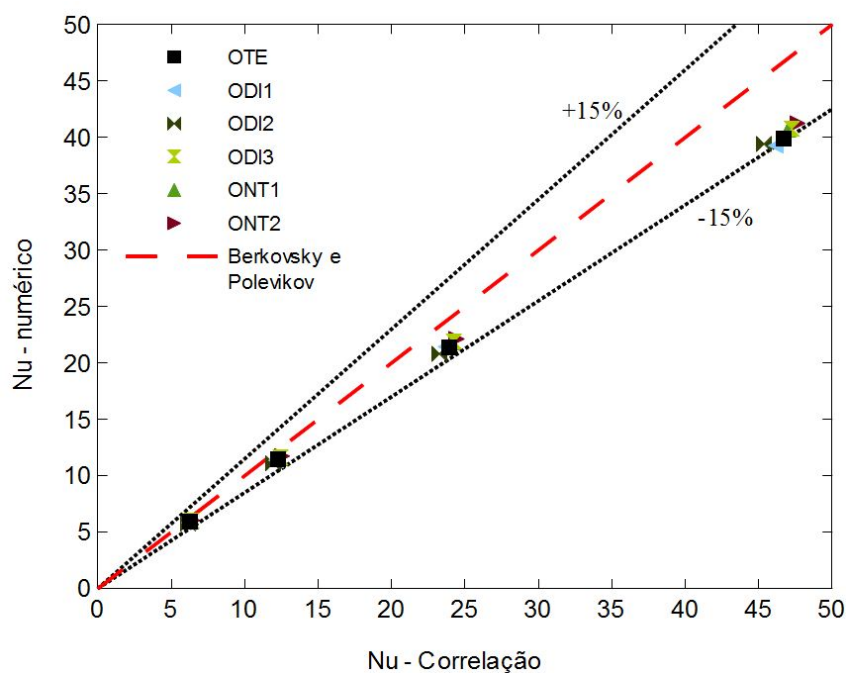


Figura 4.17 – Comparação do Nusselt com correlação.

Uma outra forma de comparar os resultados das simulações das amostras é por meio dos perfis de velocidade ao longo de linhas específicas. Ao analisarmos os perfis da componente vertical de velocidade ao longo de uma linha em  $Y=0,5$  para a configuração A, e ao longo de uma linha em  $Y=0,8$  para a configuração B, respectivamente nas condições de  $Gr=10^6$  e  $Gr=10^4$ , Fig. 4.18, verificamos que as diferenças entre os perfis de velocidade das amostras são pequenas.



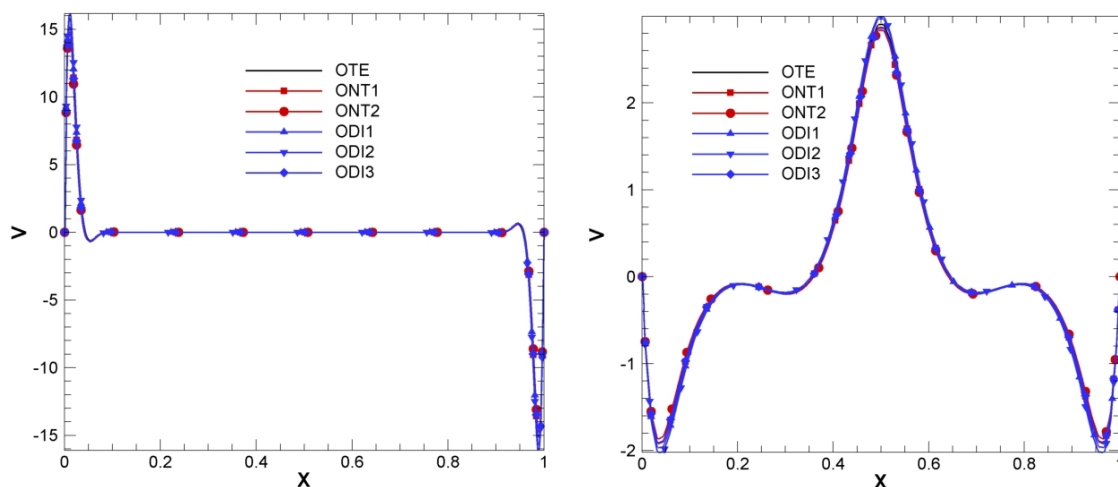
(a) Configuração A,  $Y=0,5$ ,  $Gr=10^6$ (b) Configuração B,  $Y=0,8$ ,  $Gr=10^4$ 

Figura 4.18 – Perfis de velocidade ao longo de linhas específicas.

Quando comparados os picos de velocidade destes perfis, pode-se observar que as amostras que apresentaram maior difusão viscosa em relação à difusão térmica, ou seja, maiores números de Prandtl, apresentaram menores picos de velocidade nos perfis, conforme pode ser visto na Fig. 4.19. Este comportamento nos perfis de velocidade e nos incrementos nos picos dos perfis de velocidade se repetiu nas demais condições do escoamento nas duas configurações. Portanto, os resultados apresentados na Fig. 4.19 refletem um comportamento geral na comparação dos perfis de velocidade das amostras dentro da faixa de número de Grashof considerada.

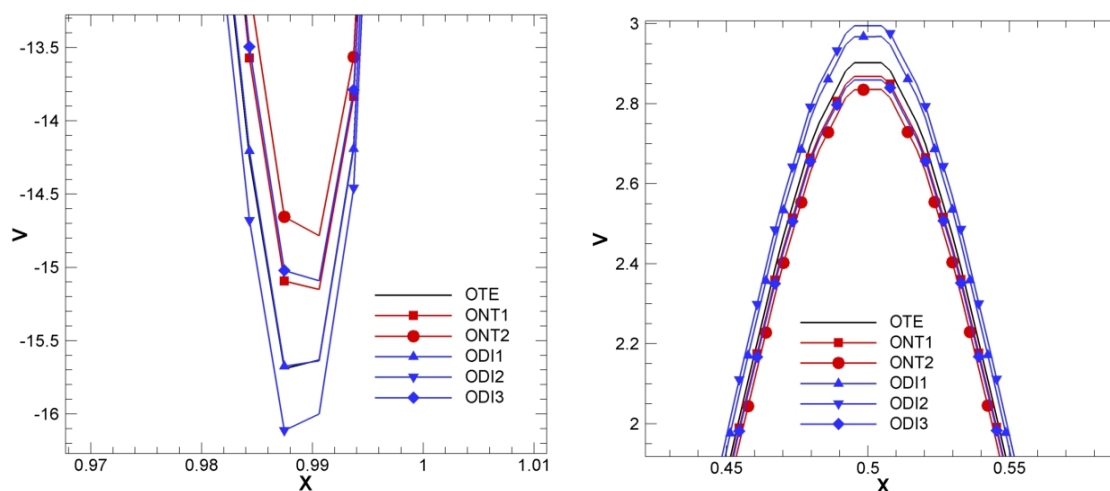
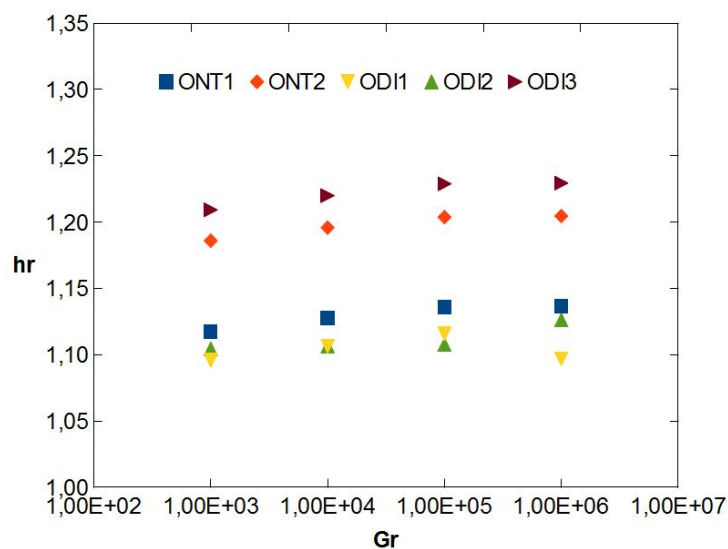
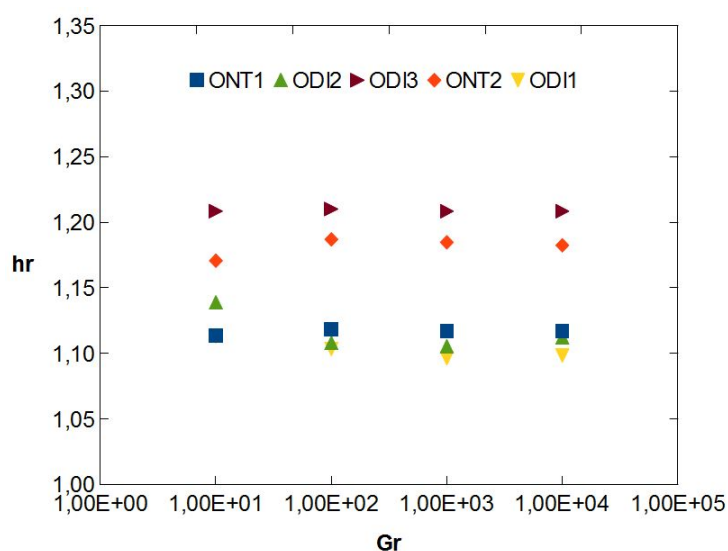
(a) Configuração A,  $Y=0.5$ ,  $Gr=10^6$ (b) Configuração B,  $Y=0.8$ ,  $Gr=10^4$ 

Figura 4.19 – Detalhe dos perfis de velocidade ao longo de linhas específicas.

Uma forma interessante de confrontar a capacidade de transferência de calor utilizando as dispersões de nanopartículas com a capacidade de transferência de calor utilizando o OTE, é por meio da avaliação do coeficiente relativo de transferência de calor, ou seja, a razão entre os coeficientes de convecção das dispersões e do OTE. Para tanto, os coeficientes relativos de convecção foram apresentados mantendo-se o número de Grashof constante para as amostras, conforme pode ser visto na Fig. 4.20, para as configurações A e B.



(a) Configuração A



(b) Configuração B

Figura 4.20 – Coeficiente relativo de convecção das dispersões de nanopartículas.

Por meio desta forma de apresentação é possível verificar que, para ambas configurações, as dispersões de nanopartículas que apresentaram maior incremento no coeficiente transferência de calor, para um mesmo Grashof, foram as amostras ODI3 e ONT2. As outras três amostras (ONT1, ODI1 e ODI2) apresentaram incrementos próximos no coeficiente de convecção, sendo que, a amostra ONT1 apresentou maiores incrementos no número de Nusselt em relação às outras duas amostras, conforme Fig. 4.15 e Fig. 4.16. O fato que tornou as amostras ODI1 e

ODI2 mais próximas, quanto ao coeficiente relativo de convecção, à amostra ONT1, ainda que esta tenha apresentado números de Nusselt maiores, foi que aquelas apresentaram incremento na condutividade térmica maior ou igual a da amostra ONT1.

Além disso, apesar do número de Nusselt (igualmente o coeficiente de convecção) aumentar com o número de Grashof, o coeficiente relativo de convecção se manteve praticamente constante com o número de Grashof, o que era esperado, visto que, a abordagem utilizada nas simulações numéricas dos escoamentos das dispersões se baseou em um modelo clássico, apenas com mudança nas propriedades físicas do fluido de base, pela dispersão das nanopartículas no mesmo.

Os resultados apresentados acima são, por si sós, suficientes para a avaliação da transferência de calor das dispersões de nanopartículas de MWCNT e diamante em OTE em relação à transferência de calor do OTE, nas condições do escoamento e configurações propostas, visto que, as condições de escoamento simuladas foram em regime laminar. Porém, com o objetivo de trazer maior elucidação sobre os padrões nos campos de velocidade e de temperatura no interior das cavidades (configuração A e B), são apresentadas na próxima seção simulações numéricas tridimensionais do escoamento de OTE no interior da configuração A e configuração B, respectivamente para,  $Gr=10^6$  e  $Gr=10^3$ .

#### 4.2.5 *Solução numérica tridimensional*

Esta seção tem caráter mais qualitativo do que quantitativo, e por isso, somente duas condições do escoamento de OTE são mostradas,  $Gr=10^6$  e  $Gr=10^3$ , respectivamente para a configuração A e configuração B.

Assim, na Fig. 4.21 são mostradas as linhas de corrente, juntamente com o campo de temperatura, e as iso-superfícies de temperatura do escoamento de OTE na configuração A.

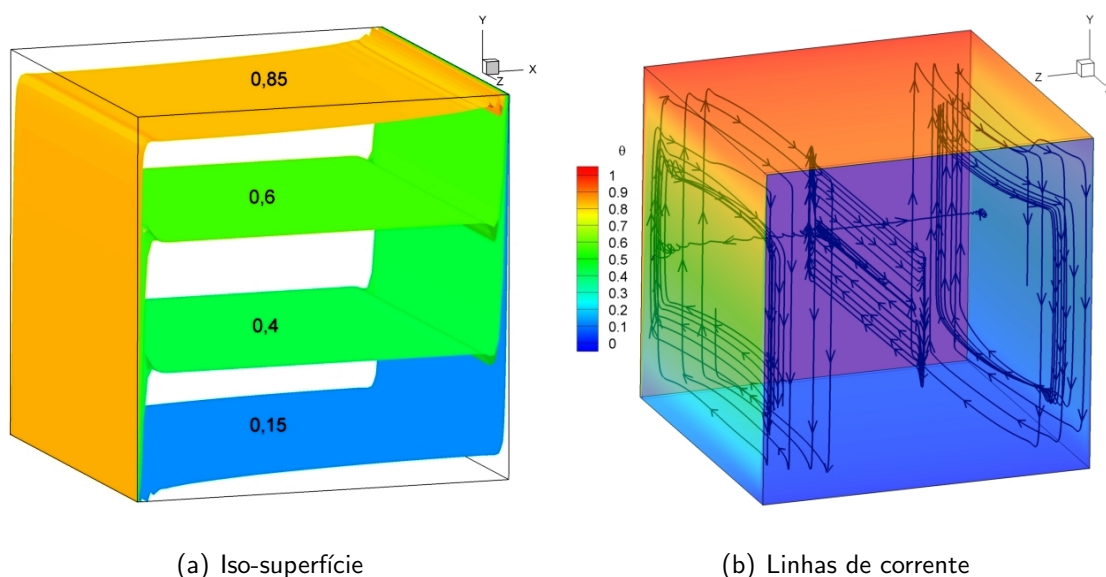


Figura 4.21 – Iso-superfícies e linhas de corrente de OTE no interior da configuração A.

Pode-se observar que o escoamento apresenta simetria em relação ao plano médio  $X - Y$  (localizado em  $Z=0,5$ ). O mecanismo de transporte gera correntes externas em direção às paredes laterais ( $Z=0$  e  $Z=1$ ), que compõem o vórtice primário, e retornam por correntes internas (vórtices secundários) até a região do plano médio, completando assim, o circuito recirculante em ambos os lados do plano de simetria. Esta característica não poderia ser evidenciada no escoamento bidimensional por motivos óbvios, mostrando portanto, que mesmo sendo um problema de escoamento laminar, a simulação tridimensional do escoamento trouxe maior riqueza de detalhes.

Nas iso-superfícies de temperatura o carregamento de uma porção de fluido aquecido (ou resfriado) até à superfície resfriada (ou aquecida) é mais facilmente observado, sendo que, é possível visualizar uma espécie de enrugamento na iso-superfície de temperatura alta (ou baixa) na proximidade da superfície de temperatura baixa (ou alta). Este efeito, que não era tão claro na simulação bidimensional, pode ser entendimento pela combinação local de sentidos cruzados do escoamento. Por exemplo, no canto superior da Fig. 4.21 (a), uma porção de fluido que escoar no sentido do eixo  $X$  encontra uma porção de fluido escoando, de forma cruzada, no sentido oposto ao eixo  $Y$ . Este efeito pode ser igualmente observado no canto diametralmente oposto, cuja explicação é análoga.

Na Fig. 4.22 é apresentado o campo de número Nusselt local do escoamento de OTE na superfície aquecida, que como pode ser visto, apresenta uma estratificação bem definida, com maiores valores na parte inferior da superfície e menores valores na parte superior. A partir deste campo foi obtido o valor de Nusselt médio, que foi de 43,67, enquanto que, no escoamento bidimensional nesta mesma condição, o número de Nusselt médio foi de 39,87.

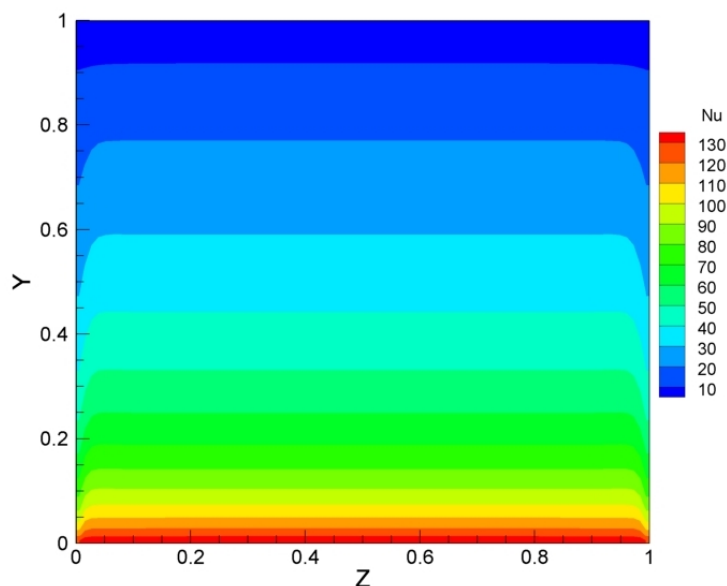


Figura 4.22 – Campo de número de Nusselt local na face aquecida do escoamento de OTE no interior da configuração A.

Na configuração B não são observados os efeitos de um enrugamento nas iso-superfícies de temperatura, como foi observado na configuração A. Porém, existe uma conectividade entre os vórtices primários, conforme pode ser visto na Fig. 4.23, onde as linhas de corrente são mostradas juntamente com duas iso-superfícies de temperatura (0,2 e 0,6). Esta conectividade se dá por meio de linhas de correntes internas e externas aos vórtices.

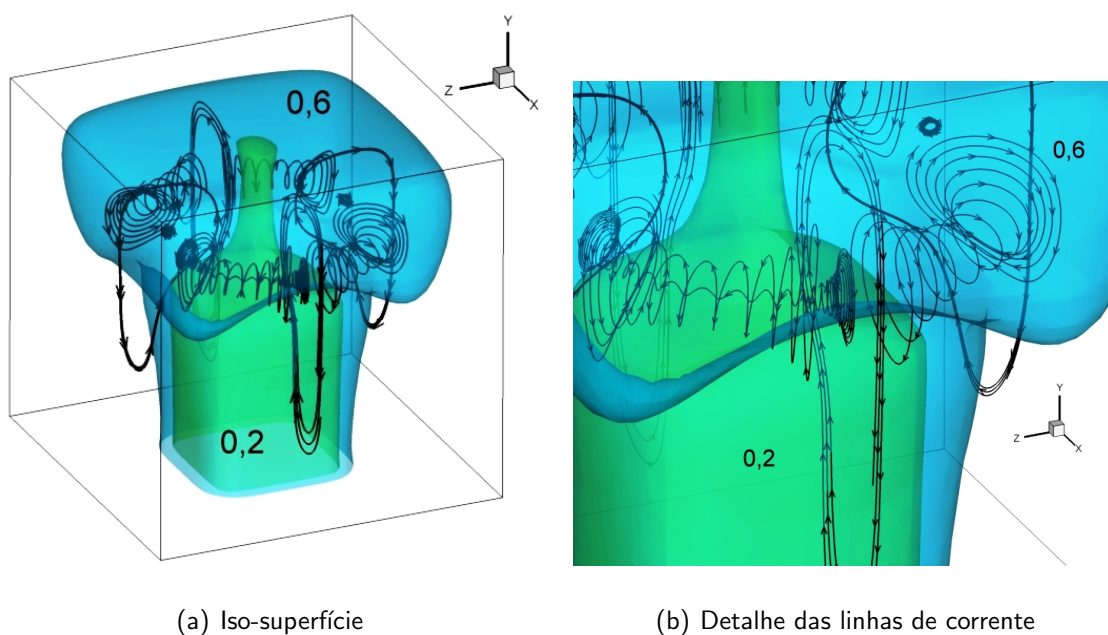


Figura 4.23 – Iso-superfícies e linhas de corrente de OTE no interior da configuração B.

As linhas de corrente internas e externas conectam recirculações adjacentes localizadas em planos médios, cujas normais são perpendiculares ao eixo  $Y$ , sendo que, as linhas de corrente internas são facilmente identificadas em uma vista superior, como pode ser visto na Fig. 4.24, enquanto que, as linhas de corrente externas não são mostradas por não serem alongadas como as linhas de corrente internas. De fato, cada quadrante da configuração B na vista superior, (Fig. 4.24), é simétrico aos demais. Tomando-se como exemplo o quadrante assinalado na figura, as linhas de corrente internas que conectam a recirculação localizada no plano médio  $Z=0,5$  com a recirculação localizada em  $X=0,5$ , tem maior velocidade tangencial que as linhas de corrente externas, que conectam as mesmas recirculações, em sentido oposto, fechando o balanço de massa. Este fato faz com que as correntes advectivas no plano médio  $X=0,5$  sejam mais acentuadas que as correntes advectivas no plano médio  $Z=0,5$ .

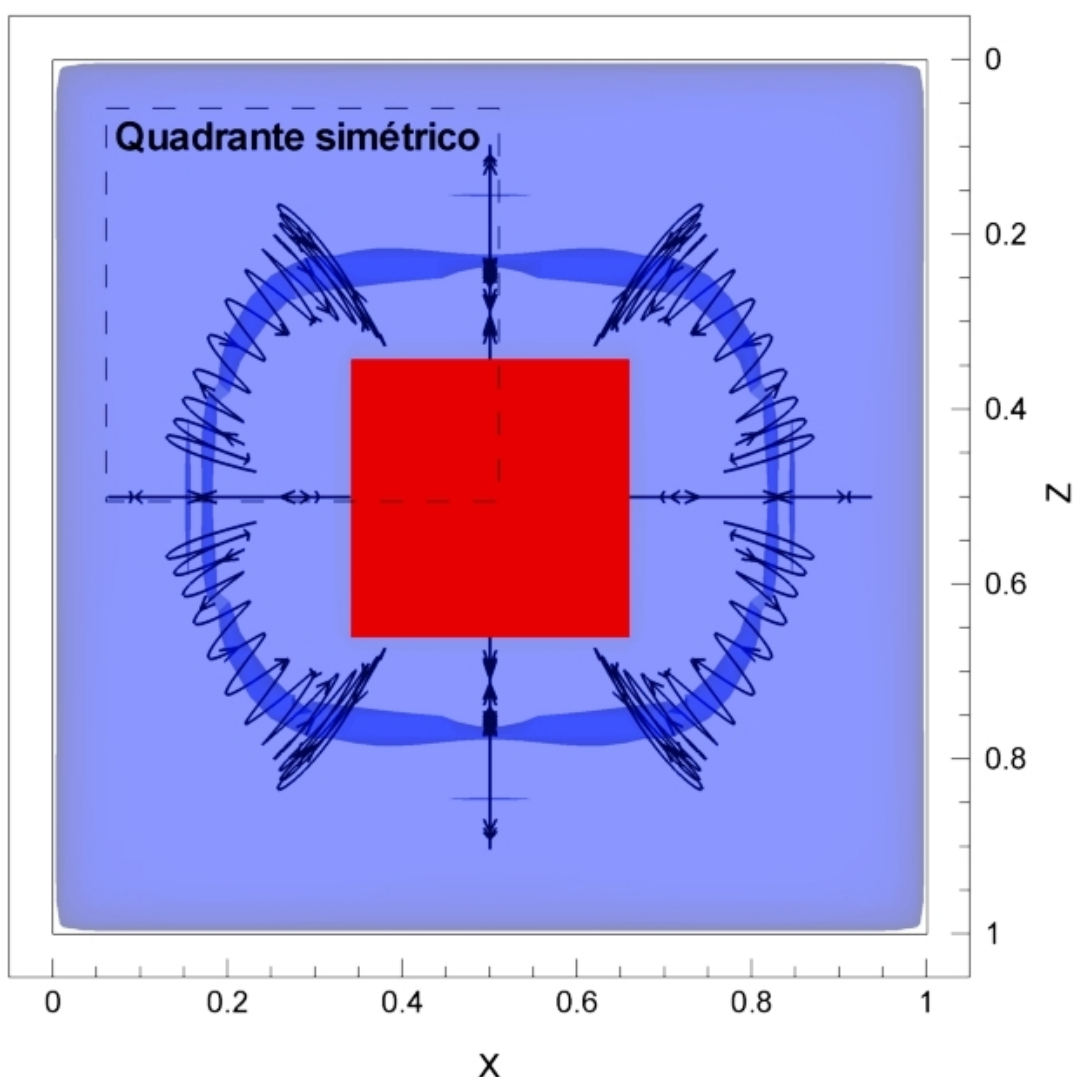


Figura 4.24 – Linhas de corrente que conectam as principais recirculações do escoamento de OTE no interior da configuração B.

Na Fig. 4.24 são mostradas também, as iso-superfícies do campo de velocidade absoluta, para um valor de 0,04, que praticamente envolvem as linhas de corrente interna, que conectam as maiores recirculações. Daí, pode-se dizer que a velocidade absoluta das linhas de corrente interna, neste caso, é em torno de 0,04.

O fato de existirem linhas de corrente ligando as maiores recirculações do escoamento, conforme foi apresentado, resulta em um transporte advectivo mais intenso nas faces com normais paralelas ao eixo  $Z$  do que o que ocorre nas faces com normais paralelas ao eixo  $X$ . Este fato, pode ser verificado, de forma qualitativa, nas diferenças existentes entre os campos



de Nusselt nas superfícies da configuração B, Fig. 4.25, onde somente uma das superfícies laterais, que são simétricas, foram apresentadas e os campos de número de Nusselt local das superfícies superiores da cavidade e do núcleo aquecido foram refletidas para as superfícies inferiores, para facilitar a visualização destes campos. É possível observar nessa figura que as superfícies laterais, que são perpendiculares, não apresentaram os mesmos campos de Nusselt, com variações das isolinhas de Nusselt.

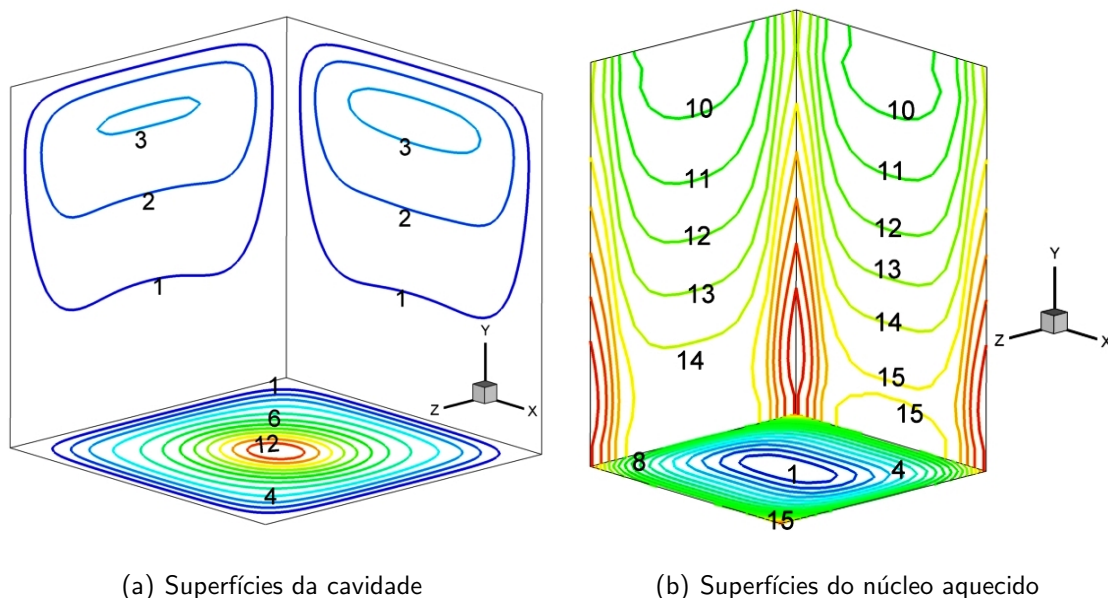


Figura 4.25 – Campo de Nusselt do escoamento de OTE nas superfícies da configuração B.

Na Tab. 4.6 são apresentados, por meio das médias ponderadas, os números de Nusselt médio nas dez superfícies (cinco aquecidas e cinco resfriadas) da cavidade. As superfícies que apresentaram correntes advectivas mais intensas, como esperado, resultaram em números de Nusselt ligeiramente maiores, comparadas àquelas que geometricamente também eram idênticas.

Tabela 4.6: Números de Nusselt nas superfícies da cavidade e do núcleo aquecido.

Cavidade					Núcleo aquecido				
X=0	X=1	Z=0	Z=1	Y=1	X=1/3	X=2/3	Z=1/3	Z=2/3	Y=1/2
1,22	1,22	1,27	1,27	4,38	2,19	2,19	2,22	2,22	0,93

O número de Nusselt médio das superfícies aquecidas, no caso tridimensional foi de 12,28, enquanto que, no caso bidimensional o número de Nusselt para a mesma condição foi de 9,22.

Com os resultados expostos, na sequência, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, reforçando sua importância no contexto geral da pesquisa, bem como, algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Esta dissertação apresentou resultados numéricos do escoamento promovido por convecção natural em cavidades fechadas de dispersões de nanopartículas de diamante e de MWCNT em OTE, cujas propriedades foram estimadas por meio de medições e de equações teóricas validadas experimentalmente. Para tanto, as dispersões de nanopartículas em OTE foram realizadas em um homogeneizador a alta pressão, que consiste em um método de preparação de dois passos. Com relação à estabilidade das dispersões, as amostras ODI1 e ODI2 superaram as outras amostras, permanecendo visualmente estáveis por mais de um dia, enquanto que nas outras amostras, este tempo não foi maior que três horas. Devido a este fato, para a realização das medições das propriedades das amostras, foi necessário agitar previamente as amostras.

Os resultados das medições de condutividade térmica mostraram que as amostras com maior concentração volumétrica apresentaram maiores incrementos na condutividade térmica. Além disso, os incrementos na condutividade térmica superaram os valores de incrementos estimados pela correlação clássica de Maxwell (1873), apresentando porém incrementos próximos aos obtidos por outros autores.

Por meio das medições do comportamento reológico das amostras, verificou-se que somente a amostra ONT3 apresentou comportamento não newtoniano, comportando-se como

fluido pseudoplástico. A amostra ODI2, apesar de não ter a menor concentração volumétrica, foi a que apresentou menor incremento na viscosidade comparado ao óleo puro, apenas 3%.

As medições da rigidez dielétrica das amostras mostraram que a utilização das nanopartículas de diamante e de MWCNT em OTE reduziu a rigidez dielétrica do OTE. Verificou-se que as nanopartículas de diamante, consideradas não condutoras elétricas, levaram a uma menor redução da rigidez dielétrica do OTE, comparada à redução provocada com a utilização das nanopartículas de MWCNT, em torno de duas vezes. Além disso, a redução na rigidez dielétrica foi mais acentuada à baixas concentrações volumétricas de nanopartículas.

O calor específico e a massa específica foram obtidas por meio de equações teóricas bem estabelecidas. Estas duas propriedades, juntamente com a condutividade térmica e a viscosidade foram utilizadas para as simulações numéricas das amostras no interior das configurações A e B.

Os resultados numéricos mostraram uma relação esperada entre os números de Grashof, Prandtl e Nusselt, concordando com a correlação numérica de Berkovsky e Polevikov (SPALDING; AFGAN, 1977). Ao comparar-se os números de Nusselt entre as amostras, as diferenças não foram grandes. Porém, as amostras com maiores números de Prandtl tiveram maiores números de Nusselt, sendo que, somente as amostras ODI1 e ODI2 não tiveram número de Nusselt maior que o do OTE, devido a terem menores números de Prandtl em relação ao do OTE. Outra diferença entre as amostras pôde ser identificada nos perfis de velocidade das amostras, devido às diferenças nos números de Prandtl das amostras. As amostras que tinham maior difusividade cinemática em relação à difusividade térmica, ou seja, maior número de Prandtl, apresentaram redução nos picos de velocidade.

Ainda que os números de Nusselt não tenham sido muito diferentes, a comparação dos coeficientes de transferência de calor das amostras, para um mesmo número de Grashof, mostra que todas as amostras apresentaram incrementos, com máximo de 23% para a amostra ODI3 na configuração A e  $Gr=10^6$ . Este resultado é interessante pois no caso de um transformador elétrico, equipamento que serviu de motivação para este trabalho, para manter o mesmo número de Grashof deve-se aumentar a diferença de temperatura entre as fontes, que neste

caso poderia implicar em um aumento na temperatura de operação do núcleo e enrolamentos do transformador, mantendo-se a transferência de energia térmica. Tal resultado leva a crer que a aplicação de dispersões em transformadores elétricos, com o objetivo de aumentar a capacidade de troca térmica, seria viável.

Os resultados das simulações tridimensionais dos escoamentos de OTE na configuração A e B, mostraram características interessantes do escoamento no interior destas cavidades fechadas, mostrando oscilações das iso-superfícies de temperatura na configuração A e linhas de corrente conectoras das recirculações principais do escoamento na configuração B.

Os resultados deste trabalho são bastante relevantes, visto que não foram encontradas, até o presente momento, publicações na literatura sobre o escoamento promovido por convecção natural, em cavidades fechadas, de nanofluidos baseados em óleo de transformador elétrico, cujas propriedades tenham sido medidas. E portanto, este trabalho tem fortes implicações nas possibilidades de aplicação de nanofluidos em equipamentos em que haja transferência de calor.

Segundo a experiência que foi adquirida ao longo deste trabalho, na sequência são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que podem auxiliar no desenvolvimento da pesquisa sobre a aplicação de nanofluidos no interior de transformadores elétricos:

- Produzir dispersões com partículas condutoras elétricas, com o objetivo de averiguar se de fato, ocorre um aumento na rigidez dielétrica do óleo puro, com a utilização destas partículas, como tem sido mostrado na literatura;
- Obter por meios físicos e/ou químicos dispersões estáveis, cuja estabilidade seja verificada de forma mais minuciosa;
- Realizar simulações numéricas do escoamento de OTE e suas respectivas dispersões em uma geometria representativa de transformador elétrico, estendendo a casos de transição à turbulência e turbulência plenamente desenvolvida;
- Finalmente, realizar ensaios da convecção natural de OTE e suas respectivas dispersões

no interior de um transformador elétrico, por meio de uma bancada física, para verificar além da transferência de calor, possíveis interações entre as nanopartículas e os campos eletromagnéticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-NADA, E. et al. Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 49, n. 3, p. 479–491, 2010.

ALADAG, B. et al. Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures. *Applied Energy*, v. 97, p. 876–880, 2012.

AMINOSSADATI, S. M.; GHASEMI, B. Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, v. 28, n. 5, p. 630–640, 2009.

ASSAEL, M. J. et al. Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water. *International Journal of Thermophysics*, v. 25, n. 4, p. 971–985, 2004.

BABY, T. T.; RAMAPRABHU, S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids. *Journal of Applied Physics*, v. 108, n. 12, 2010.

BANDARRA FILHO, E. P. et al. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 84, p. 261–267, 2014.

BARAKOS, G.; MITSOULIS, E.; ASSIMACOPOULOS, D. Natural convection flow in a square cavity revisited: Laminar and turbulent models with wall functions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 18, n. 7, p. 695–719, 1994.

BARBÉS, B. et al. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 111, n. 2, p. 1615–1625, 2012.

- BATCHELOR, G. K. The effect of brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 83, n. 1, p. 97–117, 1977.
- BECHARA, R. *Análise de falhas em transformadores de potência*. Dissertação de mestrado. São Paulo-SP, Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- BOBBO, S. et al. Viscosity of water based SWCNH and TiO<sub>2</sub> nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 36, p. 65–71, 2012.
- BOTHA, S. *Synthesis and characterization of nanofluids for cooling applications*. Thesis. South Africa: University of the Western Cape, 2007.
- BRANSON, B. T. et al. Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity. *ACS Nano*, v. 7, n. 4, p. 3183–3189, 2013.
- BRINKMAN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 20, n. 4, p. 571–571, 1952.
- BUONGIORNO, J. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, v. 128, n. 3, p. 240–250, 2006.
- BUONGIORNO, J. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, v. 106, n. 9, 2009.
- ÇENGEL, Y. A. *Transferência de Calor e Massa*. Terceira edição. São Paulo: McGraw-Hill Inc., 2009.
- CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; BOSE, C. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 34, n. 2, p. 122–130, 2010.
- CHAUPIS, J. E. R. *Simulação numérica de nanofluidos escoando no interior de dutos retos*. dissertação de mestrado. Uberlândia-MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.



CHIESA, M.; DAS, S. K. Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 335, n. 1-3, p. 88–97, 2009.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International mechanical engineering congress and exhibition, San Francisco, CA*, 1995.

Da Fonseca, A. F. *Mini curso: Introdução às Propriedades Físicas e Estruturais do Grafeno e dos Nanotubos de Carbono*. [S.l.], 2011. Departamento de Física do ICEX UFF.

DAVIS, G. D. V. Natural convection of air in a square cavity: A benchmark numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 3, n. 3, p. 249–264, 1983.

DU, Y. et al. Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 3, p. 770–776, June 2012.

DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, n. 4, p. 706–714, 2009.

EASTMAN, J. A. et al. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, v. 78, n. 6, p. 718–720, 2001.

EASTMAN, J. A. et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Materials Research Symposium*, v. 457, p. 3–11, 1997.

EINSTEIN, A. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, v. 324, n. 2, p. 289–306, 1906.

ESFE, M. H.; SAEDODIN, S. An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 55, p. 1–5, 2014.

ETTEFAGHI, E. et al. Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 46, p. 142–147, 2013.

FARAJOLLAHI, B.; ETEMAD, S. G.; HOJJAT, M. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, n. 1-3, p. 12–17, 2010.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Third edition. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2002.

FEYNMAN, R. P. *There's plenty of room at the bottom*. [S.l.], 1959. Annual Meeting of the American Physical Society.

FONTES, D. H.; PADILLA, E. L. M.; Bandarra Filho, E. P. *Verificação e validação de um código computacional para simulação de escoamentos bidimensionais*. Uberlândia-MG, Brasil: Simpósio de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, 2013.

FUSEGI, T.; HYUN, J. M.; KUWAHARA, K. A numerical study of 3D natural convection in a cube: effects of the horizontal thermal boundary conditions. *Fluid Dynamics Research*, v. 8, n. 5-6, p. 221–230, 1991.

GHIA, U.; GHIA, K. N.; SHIN, C. T. High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *Journal of Computational Physics*, v. 48, n. 3, p. 387–411, 1982.

GUIMARÃES, P.; MENON, G. Natural nanofluid-based cooling of a protuberant heat source in a partially-cooled enclosure. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 45, n. 3, p. 23–31, 2013.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

- HOFFMANN, A. R. K. *Análise experimental do desempenho termo-hidráulico de nanofluidos de nanotubos de carbono em escoamento monofásico*. Tese de doutorado. Uberlândia-MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- HWANG, Y.; PARK, H.; JUNG, W. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics*, v. 6, p. 67–71, 2006.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Quinta edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- IRANIDOKHT, V. et al. Thermal conductivity of mixed nanofluids under controlled pH conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 74, p. 63–71, 2013.
- IRANIDOKHT, V. et al. Temperature dependence of the stability and thermal conductivity of an oil-based nanofluid. *Thermochimica Acta*, v. 579, p. 27–30, 2014.
- KEBLINSKI, P. et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 45, n. 4, p. 855–863, 2002.
- KHANAFER, K.; VAFAI, K.; LIGHTSTONE, M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, n. 19, p. 3639–3653, 2003.
- KIM, J.; MOIN, P. Application of a fractional-step method to incompressible navier-stokes equations. *Journal of computational physics*, v. 59, n. 2, p. 308–323, 1985.
- KOLE, M.; DEY, T. K. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 34, n. 6, p. 677–683, 2010.
- LEE, J.-C.; KIM, W.-Y. Experimental study on the dielectric breakdown voltage of the insulating oil mixed with magnetic nanoparticles. *Physics Procedia*, v. 32, p. 327–334, 2012.
- LEE, S.; CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, v. 121, n. 2, p. 280–289, 1999.

- LEE, S. W. et al. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 54, n. 1-3, p. 433–438, 2011.
- LEONG, K. Y. et al. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering*, v. 30, n. 17-18, p. 2685 – 2692, 2010.
- LI, X.; ZHU, D.; WANG, X. Experimental investigation on viscosity of Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, v. 24, n. 1, p. 48–52, 2009.
- MAIGA, S. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. *Superlattices and Microstructures*, v. 35, p. 543–557, 2004.
- MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. segunda edição. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2004.
- MASUDA, H. et al. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. *Netsu Bussei*, p. 227–233, 1993.
- MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. [S.l.]: Oxford, Clarendon Press, 1873.
- MOREIRA, L. de Q. *Modelagem matemática de jatos em desenvolvimento espacial usando a metodologia pseudoespectral de Fourier*. tese de doutorado. Uberlândia-MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- MURSHED, S.; LEONG, K.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - a critical review. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, n. 17-18, p. 2109–2125, 2008.
- MURSHED, S.; LEONG, K.; YANG, C. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 2109–2125, 2008a.

- MURSHED, S.; LEONG, K.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - a critical review. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 2109–2125, 2008b.
- NAGASAKA, Y.; NAGASHIMA, A. Absolute measurement of the thermal conductivity of electrical conducting liquids by the transient hot-wire method. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 14, p. 1435–1440, 1981.
- NAMBURU, P. et al. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 32, n. 2, p. 397–402, 2007.
- NAN, C.-W. et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. *Journal of Applied Physics*, v. 81, n. 10, p. 6692–6699, 1997.
- NGUYEN, C. et al. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids - hysteresis phenomenon. *Applied Physics Letters*, v. 28, n. 6, p. 1492–1506, 2007.
- OLIVEIRA, G. A. *Síntese e caracterização de nanofluidos de prata*. Dissertação de mestrado. Uberlândia-MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- PADILLA, E. L. M.; LOURENÇO, M. A. S.; SILVEIRA NETO, A. Natural convection inside cubical cavities: numerical solutions with two boundary conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, v. 35, p. 275–283, 2013.
- PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, v. 11, n. 2, p. 151–170, 1998.
- PRASHER, R. et al. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *Applied Physics Letters*, v. 89, n. 13, 2006.
- PUTRA, N.; ROETZEL, W.; DAS, S. K. Natural convection of nano-fluids. *Heat and Mass Transfer*, v. 39, n. 8-9, p. 775–784, 2003.
- SAJADI, A. R.; KAZEMI, M. H. Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of  $\text{TiO}_2$ /water nanofluid in circular tube. *Heat and Mass Transfer*, v. 38, n. 10, p. 1474 – 1478, 2011.

SALINAS, S. R. A. Einstein e a teoria do movimento browniano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 2, p. 263–269, 2005.

SIMHA, R. The influence of brownian movement on the viscosity of solutions. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 44, n. 1, p. 25–34, 1940.

SOUZA, D. C. ao P. *Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso*. Dissertação de mestrado. Goiânia-GO, Brasil: Universidade Federal de Goiás, 2008.

SPALDING, D. B.; AFGAN, N. H. *Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection*. Volumes 1 e 2. Estados Unidos: McGraw-Hill Inc., 1977.

STONE, H. L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations. *Journal on Numerical Analysis*, v. 5, n. 3, p. 530–558, 1968.

TAYLOR, G. I.; GREEN, A. E. Mechanism of the production of small eddies from large ones. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A Mathematical and Physical Sciences*, v. 158, n. 895, p. 142–147, 1937.

TSUNG, T.-T. et al. Development of pressure control technique of an arc-submerged nanoparticle synthesis system (ASNSS) for copper nanoparticle fabrication. *MATERIALS TRANSACTIONS*, v. 44, n. 6, p. 1138–1142, 2003.

VENERUS, D. et al. Viscosity measurements on colloidal dispersions (nanofluids) for heat transfer applications. *Applied Rheology*, v. 20, n. 4, 2010.

WANG, X.; XU, X.; CHOI, S. U. S. Thermal conductivity of nanoparticle - fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, v. 13, n. 4, p. 474–480, 1999.

WHITE, F. M. *Viscous Fluid Flow*. Third edition. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.

XIE, H. et al. Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles. *International Journal of Thermophysics*, v. 23, n. 2, p. 571–580, 2002.

XUAN, Y.; LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 21, n. 1, p. 58–64, 2000.

YANG, Y. et al. Heat transfer properties of nanoparticles-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *Heat and Mass Transfer*, v. 48, p. 1107–1116, 2005.

YU, W. et al. *Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications*. [S.l.], 2007. Report-Argonne National Laboratory (ANL).

YU, W.; XIE, H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, p. 1–17, 2012.

YU, W. et al. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. *Physics Letters A*, v. 375, n. 10, p. 1323 – 1328, 2011.

ZHU, H.-t.; LIN, Y.-s.; YIN, Y.-s. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 277, n. 1, p. 100–103, 2004.