



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA FLUIDINÂMICA EM LEITO DE
JORRO – ESTUDOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO VIA CFD**

Dyrney Araújo dos Santos

**Uberlândia
2011**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO -
ESTUDOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO VIA CFD**

Dyrney Araújo dos Santos

**Orientadores: Claudio Roberto Duarte
Marcos Antonio de Souza Barrozo**

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química,
da Faculdade de Engenharia Química, área
de Concentração de Desenvolvimento de
Processos Químicos.**

Uberlândia - MG

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S237c Santos, Dyrney Araújo dos, 1983-
Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro
[manuscrito] : estudos experimentais e de simulação via CFD /
Dyrney Araújo dos Santos. - 2011.
106 f. : il.

Orientadores: Cláudio Roberto Duarte, Marcos Antonio de
Souza Barrozo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlân-
dia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Processo de leito de jorro - Teses. I. Duarte, Cláudio Rober-
to. II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. III. Universidade Fede-
ral de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. IV. Título.

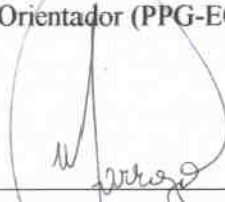
CDU: 66.047.79

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 29 /07 /2011.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Rodrigo Béttega
(FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira
(PPG-EN/UFES)

Mãe e filho, aliança que começa por meio de um cordão que, ao ser rompido, ambos se separam carregando cada qual o gosto do sangue que os unirão para sempre.

À minha mãe Sônia.

Agradecimento

Ter asas não é o suficiente se não houver o vento e nem a vontade de voar. Por isso agradeço a Deus, o qual sempre busco para orientar os meus caminhos, por me dar as asas e sempre soprar o vento a meu favor. Agradeço a minha mãe Sônia pelo sacrifício de sua vida em prol da minha e a de meus irmãos, a meu pai José, a minha tia Jane juntamente com minhas priminhas, a memória de meu avô Raimundo pelo exemplo de vida e a minha namorada Diovanina (Dio) pelo grande apoio, companheirismo e compreensão.

Aos amigos do LPD: Ricardinho (Paçoquinha), Beatriz (Bia), Marcos, Kassia, Mariana, José Luiz (Sasá), Jânio, Juliana e a amiga desde os primórdios acadêmicos, Isabele.

Agradeço a atenção e paciência com que sempre me atenderam os técnicos administrativos: Tiago, Silvino, José Henrique, Édio e Rodrigo (oficina).

Aos amigos de república: Diego e Ulisses; aos companheiros de iniciação científica: Gustavo e Irineu. Agradeço a todos, antes professores, e agora também amigos, da família FEQUI-UFU.

Agradeço ao Professor Marcos Antonio de Souza Barrozo por acreditar no potencial de cada um de seus alunos e servir como um alicerce em nossas vidas científicas.

Um agradecimento especial ao meu orientador Claudio Roberto Duarte (Mezenga) pela essencial importância que a sua presença tem sido em minha vida profissional e pessoal, obrigado por tudo.

Todos vocês direta ou indiretamente, me proporcionaram a vontade de voar.

Agradeço ao CNPq pelo incentivo à pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Símbolos.....	vi
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 – Abordagem Experimental.....	4
2.1.1 – Leito de Jorro.....	4
2.1.2 - Classificação e Apresentação de Diferentes Técnicas de Medidas em Sistemas Particulados.....	7
2.1.3 – Sonda de Fibra Óptica.....	11
2.1.4 – Conceito de Função de Correlação Cruzada na medida de Velocidade de Partículas ...	12
2.1.5 - Técnicas de tratamento Estatístico dos Dados de Correlação Cruzada	15
2.1.6 – Utilização da Sonda de Fibra Óptica na Medida de Porosidade.....	19
2.2 - Abordagem Numérica.....	21
2.2.1 - Escoamento Multifásico	21
2.2.2 – Conservação das Propriedades em um Escoamento Multifásico e Modelos de Arraste	23
2.2.3 – Distribuição de Tensão na Fase Fluida	25
2.2.4 – Distribuição de Tensão na Fase Granular.....	28
2.2.5 – Tensor Tensão Total para a Fase Granular.....	29
2.2.6 – Regimes de Escoamento Granular	30
2.2.6.1 - Regime Friccional e Tensão Friccional.....	30
2.2.6.2 - Regime Cinético-Colisional e Tensão Cinética-Colisional	35
2.2.7 – Combinação das Propriedades Cinético-Colisionais e Friccionais.....	43
2.2.8 – Método dos Volumes Finitos.....	43
2.2.9 – Tipos de Malhas Computacionais	44
CAPÍTULO III	47
MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 – Materiais e Metodologia Experimental.....	47
3.1.1 – Descrição da Unidade Experimental e do Material Particulado	47
3.1.2 – Descrição do Sistema de Medida.....	49
3.1.3 – Posicionamento da Sonda no Interior do Escoamento	51
3.1.4 – Determinação da Distância Efetiva entre os Canais que compõe a Sonda.....	52
3.1.5 – Determinação do Número de Blocos ou Subdivisões dos Dados	54
3.1.6 – Calibração da Sonda para Medida de Porosidade.....	54

3.1.7 – Validação do Método Utilizando Sonda de Fibras Ópticas na Medida de Velocidade de Partículas	56
3.1.8 – Análise da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas	58
3.1.9 – Medida de Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro	58
3.2 – Metodologia Numérica	60
3.2.1 – Configuração do <i>Cluster</i> utilizado nas Simulações	60
3.2.2 – Confecção da Malha Computacional e Teste de Independência de Malhas	61
3.2.3 – Modelos de Arraste Utilizados	63
3.2.4 - Simulação da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas	65
3.2.5 – Simulação dos Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro	66
3.2.6 – Comparação entre os Modelos de Arraste de Gidaspow <i>et al.</i> (1992) e o modelo de Gidaspow contido no Manual do <i>software</i> FLUENT [®]	66
CAPÍTULO IV	67
RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 – Resultado da Calibração da Sonda para Medida de Velocidade de Partículas	67
4.2 – Resultado da Determinação do número de Blocos para Medida de Velocidade de Partículas	68
4.3 – Validação da Medida de Velocidade Realizada por meio da Sonda de Fibras Ópticas através de Medidas obtidas por meio de uma Câmera de Alta Velocidade	69
4.4 – Resultados de Simulações Correspondentes ao Teste de Independência de Malhas	71
4.5 – Resultados de Simulações Relativos à Comparação entre os Modelos de Arraste de GIDASPOW <i>et al.</i> (1992) e o modelo de GIDASPOW contido no Manual do <i>software</i> Fluent [®]	73
4.6 – Resultados Experimentais e Simulados da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas	74
4.7 - Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro	81
4.7.1 – Perfis de Velocidade de Sólidos	81
4.7.2 – Perfis de Porosidade	87
CAPÍTULO V	95
CONCLUSÕES	95
5.1 - Principais Conclusões	95
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	96
CAPÍTULO VI	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICES	104
Apêndice I – Código para o Modelo de Arraste de Gidaspow (1994)	104
Apêndice II – Código para o Modelo de Arraste RUC (1994)	105
Apêndice III – Código para o Modelo de Arraste Gidaspow contido no Manual do Software Fluent [®]	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O leito de jorro com suas regiões características (DUARTE, 2006).	5
Figura 2.2 – Curva Característica de um leito de jorro (BACELOS, 2006).	5
Figura 2.3 – Diferentes configurações utilizadas em sondas de fibras ópticas (ZHU <i>et al.</i> , 2001).	11
Figura 2.4 - Função de Correlação Cruzada.	14
Figura 2.5 – Descrição do Tratamento 1 de cálculo da velocidade média local utilizando sonda de fibra óptica.	17
Figura 2.6 - Distribuição de Velocidades.	18
Figura 2.7 – Descrição do Tratamento 2 de cálculo da velocidade média local utilizando sonda de fibra óptica.	19
Figura 2.8 – Transferência de quantidade de movimento entre camadas de fluido (DARTEVELLE, 2003).	25
Figura 2.9– Classificação do tensor tensão (DARTEVELLE, 2003).	26
Figura 2.10 – Ilustração das três principais formas de dissipação viscosa dentro de um escoamento granular: cinética, cinética-colisional e friccional (DARTEVELLE, 2003).	28
Figura 2.11 – Determinação do ângulo de fricção interna (DARTEVELLE, 2003).	32
Figura 2.12 – Fluxo de energia em um escoamento granular multifásico (DARTEVELLE, 2003).	38
Figura 2.13 – Função de distribuição radial em função da fração volumétrica de sólidos.	41
Figura 2.14 – Malha uniforme contendo células hexahédricas (DUARTE, 2006).	45
Figura 2.15 – Malha não-uniforme contendo células tetraédricas (DUARTE, 2006).	46
Figura 2.16 – Malha híbrida (DUARTE, 2006).	46
Figura 3.1 – Ilustração geral da unidade experimental do leito de jorro.	47
Figura 3.2 – Leito de jorro: (a) ilustração do espaçamento dos orifícios de entrada da sonda utilizados; (b) dimensões do leito de jorro.	48
Figura 3.3 – Configuração das sondas de fibras ópticas utilizadas.	49
Figura 3.4 – Dimensões características da sonda de fibra óptica sendo: D_C o diâmetro de cada canal, D_G a distância geométrica entre os canais e D_O o diâmetro da sonda.	50
Figura 3.5 – Ilustração da posição dos canais da sonda de fibras ópticas no interior do escoamento.	51
Figura 3.6 – Sistema de Calibração.	53
Figura 3.7 - Destaque da malha quadriculada desenhada na parede do leito.	57
Figura 4.1 – Comparação entre as velocidades medidas por meio da sonda de fibras ópticas de configuração (a) e a velocidade real medida pelo tacômetro.	67
Figura 4.2 – Influência da divisão do número de dados no valor da velocidade de partículas calculado pela sonda.	68
Figura 4.3 – Comparação do método de medida que utiliza uma câmera de alta velocidade com aquele que utiliza sonda de fibras ópticas.	70
Figura 4.4 – Teste de independência de malhas.	71
Figura 4.5 – Malha computacional tridimensional de um leito de jorro utilizada nas simulações: (a) vista isométrica; (b) vista inferior e (c) vista superior.	72
Figura 4.6 – Corte através de um plano central da malha computacional tridimensional de um leito de jorro com a sonda posicionada no centro.	72
Figura 4.7 – Curva Característica para esferas de 1,29 mm de diâmetro.	73
Figura 4.8 – Curva Característica para esferas de 2,18 mm de diâmetro.	73
Figura 4.9 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 27m/s e altura da fonte detectada de 4,0 cm.	74
Figura 4.10 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 4,5 cm.	74
Figura 4.11 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 2,0 cm.	74

Figura 4.12 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm...	74
Figura 4.13 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,5 cm.	75
Figura 4.14 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm.....	75
Figura 4.15 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 4,0 cm.	75
Figura 4.16 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm	75
Figura 4.17 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,0 cm.....	75
Figura 4.18 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,4 cm.....	75
Figura 4.19 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,0 cm.....	76
Figura 4.20 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm... ..	76
Figura 4.21 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 6,5 cm.	76
Figura 4.22 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm.....	76
Figura 4.23 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,0 cm.	76
Figura 4.24 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm	76
Figura 4.25 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,5 cm.....	77
Figura 4.26 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,9 cm.....	77
Figura 4.27 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,5 cm.....	77
Figura 4.28 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,33 cm... ..	77
Figura 4.29 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,0 cm.	77
Figura 4.30 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,33 cm.....	77
Figura 4.31 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,5 cm.	78
Figura 4.32 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,54cm	78
Figura 4.33 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12 cm.....	78
Figura 4.34 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12,4 cm.....	78
Figura 4.35 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 10 cm.....	78
Figura 4.36 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,44cm....	78

Figura 4.37 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 11,5 cm.	79
Figura 4.38 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,86 cm.	79
Figura 4.39 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12 cm.	79
Figura 4.40 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,86 cm.	79
Figura 4.41 – Ilustração da modificação do escoamento causado pela introdução da sonda, simulado nas mesmas condições da Figura 4.9.	80
Figura 4.42 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	82
Figura 4.43 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	82
Figura 4.44 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	82
Figura 4.45 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	82
Figura 4.46 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	83
Figura 4.47 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	83
Figura 4.48 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	83
Figura 4.49 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	84
Figura 4.50 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	84
Figura 4.51 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	84
Figura 4.52 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	85
Figura 4.53 – Comparação entre os perfis simulados com e sem a introdução da sonda.	86
Figura 4.54 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	87
Figura 4.55 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	87
Figura 4.56 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	88
Figura 4.57 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 24 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	88
Figura 4.58 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar 24 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	88
Figura 4.59 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 24 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	89
Figura 4.60 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 26 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	89
Figura 4.61 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar 26 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.	89
Figura 4.62 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 26 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	90
Figura 4.63 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.	90

Figura 4.64 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.....	90
Figura 4.65 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).	91
Figura 4.66 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.....	91
Figura 4.67 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.....	91
Figura 4.68 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.....	92
Figura 4.69 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.....	92
Figura 4.70 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.....	92
Figura 4.71 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.....	92
Figura 4.72 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.....	93
Figura 4.73 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sumário de algumas técnicas de medidas não – intrusivas (CASTILHO et. al., 2006)	7
Tabela 2.2 – Sumário de algumas técnicas de medidas intrusivas (CASTILHO et. al., 2006) ..	9
Tabela 3.1 - Propriedades do material particulado	48
Figura 3.2 – Especificações técnica das sondas de fibras ópticas	50
Tabela 3.3 – Divisão do número total de dados em determinados números de blocos	54
Tabela 3.4 – Configuração do <i>Cluster</i>	60
Tabela 3.5 – Refino de malhas utilizado no teste de independência	61
Tabela 3.6 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações	62
Tabela 4.1 – Resultado das medidas de velocidade de partículas obtidas pela câmera e das medidas obtidas pela sonda na parede do leito do jorro	69

LISTA DE SÍMBOLOS

R_{xy}	valor normalizado da função de correlação cruzada, [-]
N	quantidade de dados totais coletados por cada um dos canais da sonda, [-]
N_b	número de blocos de dados, [-]
N_{db}	número de dados em cada bloco, [-]
$x(i)$	vetor posição i dos dados originados no canal 1 da sonda (CH1), [-]
$y(i)$	vetor posição i dos dados originados no canal 2 da sonda (CH2), [-]
τ	tempo de deslocamento dos dado, $[M^0 L^0 T^1]$
p	número de deslocamentos dos dados, [-]
$v_{ar,ent}$	velocidade de ar à entrada do leito, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
p_{max}	número de deslocamentos na posição dos dados que foi necessário para se alcançar o máximo valor da função de correlação cruzada, [-]
f	frequência de amostragem, $[M^0 L^0 T^{-1}]$
D_e	distância efetiva entre os canais da sonda, $[M^0 L^1 T^0]$
D_O	diâmetro do corpo da sonda, $[M^0 L^1 T^0]$
D_C	diâmetro dos canais da sonda, $[M^0 L^1 T^0]$
D_G	distância geométrica entre os canais da sonda, $[M^0 L^1 T^0]$
τ_{max}	tempo gasto para transpor os canais da sonda, $[M^0 L^0 T^1]$
v_p	velocidade da partícula, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
$\vec{v}_n$	vetor velocidade para a fase n , $[M^0 L^1 T^{-1}]$
ΔP	queda de pressão na entrada do leito, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
P_n	pressão exercida pela fase n , $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
$f_{arraste}$	força de interação entre as fases, $[M^1 L^1 T^{-2}]$
g	gravidade, $[M^1 L^1 T^{-2}]$
C_D	coeficiente de arraste
P^f	pressão friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
I_{2D}	segundo invariante do tensor tensão, $[M^0 L^0 T^{-2}]$
$D_{S,ij}$	componente do tensor taxa de deformação, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
$u_{S,}$	componente do vetor velocidade, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
P^f	pressão friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$

I	tensor tensão unitário, [-]
$P^{K/C}$	pressão cinética-colisional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$
D	tensor taxa de deformação da fase sólida, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
$\overset{\circ}{D}$	parte esférica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações associadas com a mudança de volume), $[M^0 L^1 T^{-1}]$
$\overline{\overline{D}}$	parte deviatorica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações cisalhantes), $[M^0 L^1 T^{-1}]$
E_θ	energia de flutuação dos grãos por unidade de massa, $[M^0 L^2 T^{-2}]$
C	flutuação da velocidade dos grãos, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
g_0	função de distribuição radial, [-]
e	coeficiente de restituição, [-]
d_p	diâmetro das partículas, $[M^0 L^1 T^0]$
v_l	velocidade linear, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
v_{ang}	velocidade angular, $[M^0 L^0 T^{-1}]$
v_{tac}	velocidade de partículas medidas por meio do tacômetro, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
v_{sond}	velocidade de partículas medidas por meio da sonda, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
v_{cam}	velocidade de partículas medidas por meio da câmera de alta velocidade, $[M^0 L^1 T^{-1}]$
r_C	raio da circunferência onde fixou-se esferas de vidro, $[M^0 L^1 T^0]$
r	posição radial, $[M^0 L^1 T^0]$
Vo	intensidade de sinal medido (volts)
Vo_L	intensidade de sinal medido para $\varepsilon_s = 0$ (volts)
Vo_U	intensidade de sinal medido para $\varepsilon_s = \varepsilon_U$ (volts)
V_S	volume de sólidos, $[M^0 L^3 T^0]$
V_A	volume de água, $[M^0 L^3 T^0]$
L	distância percorrida pela partícula, $[M^0 L^1 T^0]$
N_F	número de frames gastos pela partícula para percorrer a distância L , [-]
β	coeficiente de troca de momentum entre as fases, $[M^1 L^0 T^{-1}]$
β_{Ergun}	coeficiente de troca de momentum entre as fases na equação de Ergun, $[M^1 L^0 T^{-1}]$
β_{Wen-Yu}	coeficiente de troca de momentum entre as fases na equação de Wen-Yu, $[M^1 L^0 T^{-1}]$
k	condutividade de temperatura granular

q	Fluxo condutivo de temperatura granular
C_g	flutuação da velocidade das moléculas do gás, $[M^0L^1T^{-1}]$
A	parâmetro da Equação (2.21)
F	parâmetro da Equação (2.19)
n	parâmetro da Equação (2.19)
A_{RUC}	parâmetro da Equação (3.14)
B_{RUC}	parâmetro da Equação (3.14)
H_e	parâmetro da Equação (3.14)
H_{et}	parâmetro da Equação (3.14)
Re_r	número de Reynolds relativo, [-]

Símbolos gregos

ρ_n	densidade da fase n, $[M^1L^{-3}T^0]$
ε_n	fração volumétrica da fase n, [-]
τ_n	tensor tensão da fase n, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
τ_{zx}	tensão cisalhante, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$ viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$
τ_s	tensor tensão total da fase granular, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
$\tau^{k/c}$	tensor tensão cinético-colisional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
τ^f	tensor tensão friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
$\mu^{bulk f}$	viscosidades bulk friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$
μ^f	viscosidade cisalhante friccional, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$
ϕ	ângulo de fricção interna ou ângulo de repouso do material, [-]
ε_S	fração volumétrica de sólidos, [-]
$\varepsilon_{S,min}$	valor limite de fração volumétrica de sólidos onde começa a tornar-se importante as influências friccionais, [-]
$\varepsilon_{S,máx}$	limite máximo de empacotamento, [-]
$\mu^{bulk K/C}$	viscosidades bulk cinética-colisionail, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$
$\mu^{K/C}$	viscosidades cisalhante cinética-colisionail, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$

θ	temperatura granular, $[M^0 L^2 T^{-2}]$
ε_g	fração volumétrica de gás (porosidade), [-]
ε_U	fração volumétrica de sólidos na condição de empacotamento, [-]
Φ	termo de geração de energia de flutuação granular
γ_s	termo dissipativo de energia de flutuação granular
$\hat{\rho}_s$	densidade bulk da fase sólida, $[M^1 L^{-3} T^0]$
Φ_{gs}	função de transição entre o regime de Ergun e o de Wen-Yu, [-]

RESUMO

O leito de jorro é caracterizado por estabelecer um movimento cíclico e uniforme das partículas em seu interior promovendo, desta forma, um íntimo contato entre as fases. Esta característica em seu escoamento é de fundamental importância industrial, visto que a maioria dos processos requerem uma adequada taxa de transferência de massa e energia. No entanto, por possuir regiões de escoamento com diferentes características e, a depender de suas condições operacionais e geométricas, poder vir a operar em regime de instabilidade, um maior entendimento de seu comportamento fluidodinâmico é necessário. No intuito de se obter perfis de velocidade e porosidade em um leito de jorro cônico-cilíndrico, utilizou-se de uma técnica intrusiva a qual emprega como sonda de medida fibra óptica. Para a validação das medidas de velocidade realizadas por meio da sonda, foi utilizada uma técnica não-intrusiva composta por uma câmera de alta velocidade. Já para a calibração da sonda para a medida de porosidade, considerou-se a suposição de linearidade entre a intensidade do sinal de voltagem captado pela sonda e a concentração de sólidos em um determinado volume de medida. As medidas foram realizadas a diferentes condições de velocidade de ar, diâmetros de esferas de vidro e alturas em relação à entrada do leito. Uma investigação sobre o quanto da perturbação causada ao escoamento na utilização de uma técnica intrusiva foi realizada por meio do registro da variação da altura e do deslocamento da fonte em relação ao eixo central do leito. Empregou-se a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), utilizando-se do modelo Euleriano Granular Multifásico, na determinação dos perfis de velocidade e porosidade, e na análise numérica da perturbação causada ao escoamento pela introdução da sonda nas mesmas condições empregadas experimentalmente. Como modelo de arraste, utilizou-se dos modelos de GIDASPOW *et al.* (1992), GIDASPOW (1994) e RUC (1994). Utilizou-se, também, do modelo de GIDASPOW que se encontra no manual do *software* Fluent[®] e, visto que o mesmo se encontra redigido de forma equivocada neste manual, pequenas variações quando comparados ao modelo correto foram obtidas. Os perfis simulados utilizando-se dos modelos de GIDASPOW *et al.* (1992) e GIDASPOW (1994) subestimaram os valores de velocidade na região de jorro enquanto o modelo RUC superestima os valores de velocidade nesta mesma região, sendo que, na região anular tanto os perfis experimentais quanto os simulados, com diferentes modelos de arraste, se mostraram próximos. Foi possível prever, através da análise dos perfis de fração volumétrica de sólidos simulados, a perturbação causada pela introdução da sonda ao escoamento, verificando uma satisfatória correspondência entre estes e o experimental. Esta perturbação foi detectada com maior intensidade na região de jorro e na região de transição entre esta e a região anular. A análise de perturbação mostrou-se de fundamental importância quando da simulação de perfis de propriedades do escoamento obtidos experimentalmente por uma técnica intrusiva, pois, na prática os trabalhos sobre simulações encontrados na literatura não levam o fenômeno da perturbação em consideração.

Palavras chave: leito de jorro, sonda de fibra óptica, modelagem multifásica, método intrusivo.

ABSTRACT

The spouted bed is characterized by establishing an effective contact between the phases and promoting a cyclical and uniform movement of the particles. This feature is of great industrial importance since most processes require an adequate rate of mass and energy transfer. However, depending on operating and geometric conditions the spouted bed can operate in an unstable regime thus reducing its efficiency. So, a better understanding about its fluid-dynamic behavior is necessary. In order to obtain velocity and porosity profiles in a conical-cylindrical spouted bed, an intrusive fiber optical technique was used. To validate the velocities measured by the probe a non-intrusive method composed by a high-speed video camera was used. As for the calibration of the probe to measure the porosity, it was considered the assumption of linearity between the intensity of the voltage signal captured by the probe and the concentration of solids in a given volume of measurement. The measurements were carried out at different air velocity conditions, diameters of glass spheres and heights in the spouted bed. An investigation about the disturbance caused to the flow by an intrusive technique was performed by recording the height variation and displacement of the fountain. In this work, the Computational Fluid Dynamics (CFD), using the Eulerian Granular Multiphase model was used to determine the porosity and velocity profiles and numerical analysis of the flow disturbance caused by the introduction of the probe under the same experimental conditions. The following drag models were investigated: GIDASPOW *et al.* (1992), GIDASPOW (1994) and RUC (1994). The GIDASPOW model found in the Fluent® user guide was also used and, as it is written so erroneous in this user guide, small variations when compared to the correct model were obtained. The profiles obtained by simulations using the models GIDASPOW *et al.* (1992) and GIDASPOW (1994) appeared to underestimate the velocity values in the region of jet while the RUC model slightly overestimates the velocity values in the same region. In the annular region the simulations agree well with the experimental results regardless of the drag model used. It was possible for all conditions examined experimentally to foresee, by means of analysis of the profiles of solids volume fraction simulated, the disturbance caused by the introduction of the probe to the flow. Disturbance was detected with greater intensity in the region of jet and in the transition region between it and the annular region. The disturbance analysis is of great importance while simulating the properties of the flow obtained experimentally by means of an intrusive technique, because in practice the works on simulations present in the literature do not take the disturbance phenomenon into account.

Key words: spouted bed, fiber optical probe, multiphase modeling, intrusive method.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A maioria dos processos industriais, tais como, secagem, separação sólido-líquido, inoculação de sementes, recobrimento de comprimidos etc., necessitam de um efetivo contato entre as fases envolvidas com a finalidade de alcançar elevados coeficientes convectivos de transferência de massa, energia e quantidade de movimento, possibilitando, desta forma, maiores eficiências em suas operações.

Neste contexto surge o leito de jorro desenvolvido, inicialmente, por MATHUR e GISHLER (1955) que, diferentemente do leito fluidizado, em que o movimento das partículas é aleatório, apresenta movimentos cíclicos e mais uniformes das partículas, sendo esta uma das razões do porque tem sido aplicado em diversas atividades industriais.

O leito de jorro apresenta três regiões de comportamento fluidodinâmico distintos, região anular, região de jorro e região de fonte, possuindo, cada uma delas, características intrínsecas, o que aumenta ainda mais a complexidade em seu estudo.

Uma das grandes dificuldades encontradas na utilização de um leito de jorro ocorre quando da necessidade de *scale up*, visto que, dependendo das condições geométricas e operacionais, o leito de jorro apresenta instabilidades as quais são caracterizadas por formações de bolhas acarretando o surgimento de pulsações da fonte e, conseqüentemente, a diminuição de sua eficiência.

Logo, a fim de superar estes problemas, um melhor entendimento das propriedades do escoamento e do comportamento deste sistema multifásico é de suma importância.

Dentre muitas variáveis, a distribuição de velocidade de partículas e de fração volumétrica de sólidos tem recebido considerável atenção, possivelmente por causa de suas peculiaridades e efeitos determinantes sobre o fenômeno de transferência (AMOS, *et al.*, 1996; OLAZAR *et al.*, 1998; SAN JOSÉ *et al.*, 2005).

Para a mensuração destas propriedades existem diferentes técnicas as quais são classificadas em intrusivas e não-intrusivas. As técnicas intrusivas são constituídas, normalmente, por sondas que, necessariamente, devem ser introduzidas no interior do equipamento para a medida de determinada propriedade. Este tipo de técnica possui a vantagem de ser relativamente barata e de fácil construção, porém, possui a desvantagem de causar pequenos distúrbios ao escoamento dependendo de sua geometria.

Por outro lado, as técnicas não-intrusivas, determinam as propriedades do escoamento por meio de um instrumento localizado fora do equipamento. A maior vantagem desta técnica é a não necessidade de contato direto com o meio material, porém, são normalmente restritas a equipamentos de pequenas dimensões devido ao seu alto custo e peso (WERTHER, 1999).

Das técnicas intrusivas destaca-se a sonda de fibra óptica, por ter a capacidade de mensurar, ao mesmo tempo, perfis de velocidade e porosidade e por atender bem as condições necessárias de medida reportadas por SNOEK (1990).

A técnica que utiliza sonda de fibra óptica tem sido utilizada por vários autores para a medida de propriedades do escoamento em leitos de jorro (OLAZAR *et al.*, 1998; SAN JOSÉ *et al.*, 2005; HE *et al.*, 1994).

Recentemente, a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ/UFU), adquiriu, por meio de projetos, um equipamento de medida composto por duas sondas de fibras ópticas fabricado pelo *Institute of Process Engineering Chinese Academy of Sciences*.

Em virtude desta nova aquisição, este trabalho possui o importante papel, no que diz respeito à abordagem experimental, de inicializador de uma nova linha de pesquisa dentro desta faculdade.

Atualmente, com o grande avanço na área computacional, no que se refere ao melhoramento de processamento e armazenamento de dados, surgem ferramentas, chamadas CFD (*Computational Fluid Dynamics*), as quais envolvem a solução numérica das equações de conservação e equações constitutivas. Seu uso vem se tornando cada vez mais comum na investigação de fenômenos físicos que ocorrem nos processos industriais por possibilitar um entendimento do comportamento das variáveis a níveis locais em uma determinada região de um dado equipamento.

No âmbito computacional, o conhecimento da fluidodinâmica em um leito de jorro é de suma importância para o projeto do mesmo para novas aplicações, para a otimização de processos já existentes, bem como para compreender algumas limitações que restringem a sua utilização, principalmente no que diz respeito ao aumento de escala (*scale up*).

Por outro lado, este grande avanço tecnológico, referente aos cálculos computacionais, contrasta-se com a escassez de dados experimentais, os quais são de fundamental importância para validação de modelos matemáticos.

Várias abordagens, tais como, para sistemas diluídos utilizando-se da teoria cinética do escoamento granular ou para a fase densa utilizando-se dos modelos friccionais, assim

como modelos multifásicos, modelos de turbulência, modelos constitutivos (por exemplo, os modelos de arraste) etc., já se encontram disponíveis na maioria dos *softwares* de CFD.

Em virtude de a força de arraste ser de fundamental importância na contabilização da interação das fases gás-sólido, a investigação dos modelos de arraste constitui-se de suma importância na descrição correta de tais escoamentos.

Para a simulação de perfis de propriedades do escoamento obtidos experimentalmente por uma técnica intrusiva, não se encontra na literatura um estudo sobre a perturbação ocasionada pela introdução da sonda.

Diante do exposto, em face da relevância do leito de jorro e da técnica de CFD em seu estudo, o presente trabalho teve como objetivos principais:

- ❖ obter, experimentalmente, perfis radiais de velocidade de partículas e porosidade em um leito de jorro cônico-cilíndrico em diferentes condições de velocidade de ar e alturas em relação à entrada do leito por meio da utilização da técnica de fibra óptica;
- ❖ simular, por meio das técnicas de CFD, os perfis radiais de velocidade e porosidade obtidos experimentalmente, utilizando-se de diferentes modelos de arraste implementados via UDF (*User Defined Function*);
- ❖ realizar um estudo, através de experimentos e simulações, de possíveis perturbações causadas pela introdução da sonda no escoamento.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Abordagem Experimental

Esta seção tem o intuito de apresentar alguns processos os quais utilizam o leito de jorro como uma de suas operações unitárias, assim como descrever os principais regimes de escoamento presentes durante a operação deste equipamento. Tem como intuito, também, a descrição de técnicas utilizadas na medida de propriedades em sistemas particulados, dando ênfase à utilização da sonda de fibra óptica juntamente com seu princípio de funcionamento adotado para a medida de perfis de velocidade e porosidade.

2.1.1 – Leito de Jorro

Diferentemente dos sistemas gás-sólidos agitados mecanicamente, o leito de jorro, desenvolvido por MATHUR e GISHLER (1955), é um sistema gás-sólido em que se utiliza como agitação das partículas presentes em seu interior, uma corrente de gás. Os autores desenvolveram este equipamento inicialmente para secagem de trigo devido à sua característica de boa agitação dos sólidos e um efetivo contato gás-sólido.

O movimento cíclico e uniforme das partículas no interior do leito de jorro, característico deste equipamento, proporciona um bom contato fluido-partícula, garantindo elevados coeficientes de calor e de transferência de massa, justificando assim seu uso em secagem e inoculação de grãos (DUARTE, 2006).

O leito de jorro pode também ser utilizado em muitos outros processos, tais como oxidação parcial catalítica de metano para a síntese de gás (MARNASIDOU *et al.*, 1999), recobrimento de comprimidos (KUCHARSKI e KMIEK, 1983), gaseificação de carvão e liquefação (UEMAKI e TSUJI, 1986), pirólise de serragem ou de mistura de resíduos de madeira (AGUADO *et al.*, 2000; OLAZAR *et al.*, 2000), inoculação de sementes de soja (DUARTE *et al.*, 2006) etc., encontrando-se, a maioria destes processos, em pleno desenvolvimento.

Como mostrado na Figura 2.1, o leito de jorro possui, como característica do seu escoamento, três regiões distintas: anular, jorro e fonte.



Figura 2.1 – O leito de jorro com suas regiões características (DUARTE, 2006).

A geometria de um leito de jorro é de fácil confecção sendo composta, comumente, por: uma base cônica utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito e por um vaso normalmente cilíndrico circular sendo que, o uso de um vaso completamente cônico foi prática comum em alguns estudos (PASSOS *et al.*, 1997).

O gás em alta velocidade é adicionado a este conjunto pela base inferior do tronco de cone, permeando entre as partículas. A intensa circulação destas partículas começa quando a vazão do gás é suficiente para promover o transporte pneumático das mesmas na região central do leito. Ao atingirem a fonte, as partículas perdem totalmente sua energia cinética, caindo posteriormente na região anular e aí fazem um movimento descendente até regiões inferiores do leito. A região anular, caracterizada pelo deslizamento das partículas em contracorrente ao escoamento do gás, possui baixa porosidade.

A caracterização fluidodinâmica de um leito de jorro pode ser feita por meio da construção da sua curva característica, a qual representa a queda de pressão em função da velocidade e/ou vazão de gás injetado na entrada do leito (Figura 2.2).

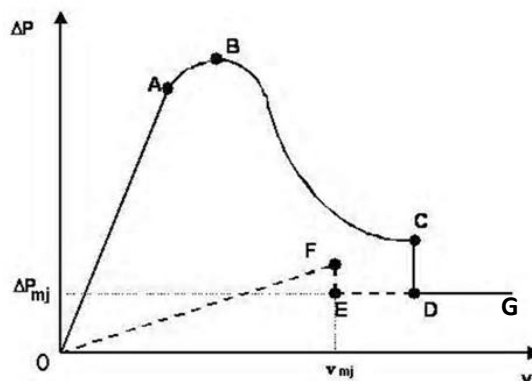


Figura 2.2 – Curva Característica de um leito de jorro (BACELOS, 2006).

A curva característica representa fisicamente a transição entre um leito estático e um leito de jorro estabelecido, sendo os trechos da curva ilustrados na figura anterior (linha sólida) descritos abaixo (MATHUR e EPSTEIN, 1974):

- ❖ Com uma baixa velocidade do gás este simplesmente percola através das partículas sem as perturbar e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático (trecho OA);
- ❖ Em uma certa velocidade do gás, a velocidade do jato torna-se suficientemente alta para arrastar as partículas da vizinhança imediata da entrada de fluido, formando uma cavidade relativamente vazia pouco acima desta entrada. As partículas que rodeiam a cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compactado, que oferece uma resistência maior para fluir. Por isso, apesar da existência de uma cavidade oca, a queda de pressão total através do leito continua a aumentar;
- ❖ Com o aumento da velocidade do gás, a cavidade alonga para um jorro interno. O arco de sólidos compactados acima do jorro interno aumenta de maneira que a queda de pressão através do leito aumenta mais até alcançar o valor máximo (trecho AB);
- ❖ Se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno relativamente oco torna-se grande em comparação com os sólidos empacotados acima do jorro e assim a pressão cai (trecho BC);
- ❖ Muitos sólidos são deslocados da região central causando uma expansão significativa do leito. Esta expansão do leito causa uma diminuição na queda de pressão. Com um pequeno aumento na velocidade do gás, atinge-se o chamado ponto de jorro incipiente; o jorro interno quebra-se e a concentração de sólidos na região exatamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma considerável redução na queda de pressão. Assim todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro (trecho CD);
- ❖ Caso continue aumentando a velocidade do gás, o gás adicional simplesmente passa através da região de jorro, o qual é agora estável e a resistência é para atravessar o caminho, causando uma elevação da fonte sem efeito significativo na queda de pressão (trecho DG).

A linha sólida representada na Figura 2.2 é dita “curva de ida”, devido ao fato de ser obtida pelo aumento gradativo da velocidade de gás, enquanto que a linha pontilhada é denominada “curva de volta”, por ser obtida por um processo inverso ao anterior.

Observa-se a ocorrência de histerese quando da obtenção da “curva de volta”, sendo isto devido ao fato de que, na volta o leito já se encontrar na condição de expandido.

Um parâmetro de importância na execução do projeto e do aumento de escala em leitos de jorro é conhecido como velocidade de mínimo jorro, o qual pode ser obtido através da curva característica como a ilustrada na Figura 2.2 (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Segundo alguns autores (KUCHARSKI e KIMIEC, 1983; MARKOWSKI e KAMINSKI, 1983; OLAZAR *et al.*; 1992; JING *et al.*; 2000) a velocidade de mínimo jorro é o ponto onde a queda de pressão começa a parar de cair ou começa a subir na curva característica (Figura 2.2).

2.1.2 - Classificação e Apresentação de Diferentes Técnicas de Medidas em Sistemas Particulados

Medidas de propriedades fluidodinâmicas em escoamentos multifásicos são de grande interesse para pesquisadores no que se refere ao entendimento do comportamento fluidodinâmico de tais sistemas, seja para aplicação em projeto e otimização ou para servir como base para o estudo de fluidodinâmica computacional (CFD), validando, desta forma, modelos e contribuindo assim para o seu desenvolvimento.

As técnicas de medidas são classificadas em intrusivas e não-intrusivas, sendo as primeiras, incumbidas desta classificação pelo fato de ser preciso a introdução de um determinado tipo de dispositivo (mais comumente um tipo de sonda) no interior do escoamento, podendo, desta forma, perturbar seu comportamento. Por outro lado, as técnicas não-intrusivas, como o próprio nome o diz, não necessita da introdução de qualquer tipo de dispositivo, ou seja, é uma técnica independente de contato com o meio material.

CASTILHO *et al.* (2006) nos proporciona uma visão geral de alguns dos vários tipos de técnicas intrusivas e não-intrusivas destacando suas aplicações, princípios de medida, vantagens e limitações, as quais são descritas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 – Sumário de algumas técnicas de medidas não-intrusivas (CASTILHO *et al.*, 2006).

LDV (<i>Laser Doppler Velocimetry</i>)	Tipo de Medida:	Velocidade das partículas.
	Aplicações:	Tecnologia FCC, LFC <i>riser</i> e <i>downer</i> .
	Princípio:	Diferença entre as frequências de um raio de luz emitido por uma fonte <i>laser</i> e aquela espalhada por uma partícula em movimento. Tal diferença é proporcional à velocidade da partícula.
	Vantagens:	Não-intrusiva, alta acuidade.
	Limitações:	Utilizada, normalmente, para sistemas diluídos em que a fração mássica de sólidos venha a ser menor do que 0,015.

Continuação da Tabela 2.1

LDA (<i>Laser Doppler Anemometry</i>)	Tipo de Medida:	Velocidade das partículas; possibilidade de medir concentração de sólidos.
	Aplicações:	Leito fluidizado circulante (LFC), fluxo turbulento de partículas em curva.
	Princípio:	Partículas de traçador do tamanho do micron são introduzidas em um meio contínuo a fim de medir as características cinemáticas de seu fluxo.
	Vantagens:	Não-intrusiva, alta acuidade.
	Limitações:	Utilizada normalmente para sistemas diluídos.
Técnica de traçadores por radiação γ	Tipo de Medida:	Velocidade e concentração de sólidos.
	Aplicações:	LFC e tecnologia FCC, caracterização de solos, sedimentação.
	Princípio:	Utilização de radioisótopos (traçadores) para se obter informações relativas à fluidodinâmica em processos multifásicos. Consiste em se medir a fração atenuada por uma amostra, da intensidade do feixe mono energético de radiação gama.
	Vantagens:	Não-intrusiva.
	Limitações:	Periculosidade do manuseio; baixa acuidade (obtem valores médios para velocidade).
Técnica de traçadores fosforescentes	Tipo de medida:	Velocidade e concentração de sólidos.
	Aplicações:	Tecnologia FCC, medida do tempo de residência em um <i>riser</i> LFC.
	Princípio:	Emprega a característica do material fosforescente tornar-se fluorescente por um breve período de tempo. Esses materiais são misturados com pós de alumina, entre outros, para formar partículas traçadoras de tamanho e densidade semelhantes aos de partículas típicas de FCC, por exemplo.
	Vantagens:	Fácil e imediata injeção e detecção do traçador por um pulso luminoso, não há acumulação no leito (decaimento do traçador).
	Limitações:	Possibilidade da partícula do traçador não representar ou não emular todas as propriedades físicas da partícula sólida.
Tomografia computadorizada por raios-X	Tipo de medida:	Concentração de sólidos.
	Aplicações:	Escoamento multifásico na tecnologia FCC, leito fluidizado, coluna de destilação semi-batelada em sistemas multifásicos de ar-água-celulose.
	Princípio:	Fornece imagens de seções transversais de objetos por intermédio do princípio de atenuação da radiação nos meios materiais.
	Vantagens:	Medida não-intrusiva de concentrações locais dos sólidos mesmo próximos à parede do tubo.
	Limitações:	Tempo de aquisição é muito maior comparada à tomografia por capacitância elétrica; necessária a calibração do sistema tomográfico.

Continuação da Tabela 2.1

Tomografia por capacitância elétrica	Tipo de medida:	Concentração de sólidos.
	Aplicações:	Leito fluidizado, transporte pneumático, LFC.
	Princípio:	Consiste da inserção de placas de eletrodos ao redor do reator a ser examinado. Por meio da excitação dos eletrodos, as medidas obtidas são reconstruídas para formar uma imagem.
	Vantagens:	Mais rápida e robusta técnica de geração de dados destinada à análise de vários sistemas multifásicos.
	Limitações:	Problemas técnicos quando utilizada em escala industrial, relacionados à re-calibração do equipamento e à acumulação de carga eletrostática e faísca.

Tabela 2.2 – Sumário de algumas técnicas de medidas intrusivas (CASTILHO *et al.*, 2006).

Sondas de fibra óptica	Tipo de Medida:	Velocidade e concentração de sólidos.
	Aplicações:	Leito fluidizado, leito fluidizado circulante, leito de jorro, tecnologia FCC (<i>riser</i> e <i>downer</i>).
	Princípio:	Detecta a luz refletida a partir da superfície de uma partícula ou aglomerados de partículas em movimento. A luz refletida é convertida em sinal elétrico, que deve ser calibrado para relacionar à concentração.
	Vantagens:	Relativa baixa intrusividade e satisfatória acuidade.
	Limitações:	Calibração da sonda de fibra óptica, limitada à baixa temperatura.
Sondas de capacitância	Tipo de Medida:	Concentração de sólidos.
	Aplicações:	LFC, combustor LFC, leito fluidizado.
	Princípio:	A medida capacitiva da concentração do volume dos sólidos (C_v) é baseada fisicamente na medida da constante dielétrica relativa K_e de uma suspensão de fluxo líquido-sólido, que depende diretamente da concentração volumétrica das duas fases.
	Vantagens:	Poderosa para investigações da estrutura do fluxo mesmo sob as condições de reatores de leito fluidizado industriais.
	Limitações:	Dependência da constante dielétrica relativa da matéria na temperatura.

Muitos dos métodos anteriormente citados são comumente encontrados na literatura ao contrário de outros que tendem a cair em desuso devido às suas limitações operacionais ou devido à periculosidade em seu manuseio, como é o caso da técnica de traçadores por radiação γ .

WERTHER *et al.* (1996) compararam uma técnica intrusiva, sonda de fibras ópticas, com a técnica LDA (*Laser Doppler Anemometry*), a qual é classificada como sendo não-intrusiva, na medida de velocidade de sólidos. As medidas foram comparadas sob as mesmas condições na parte superior da zona diluída de um leito fluidizado circulante (CFB). Os

autores concluíram que, contrariando as afirmações reportadas na literatura, a técnica LDA pode ser usada em um sistema gás-sólido com concentrações de sólidos acima de 5% se a luz do *laser* for introduzida via uma sonda de fibras ópticas dentro do escoamento. Concluíram também que, as grandes concordâncias entre as medidas realizadas pelas duas técnicas mostraram que medidas realizadas por meio de sondas intrusivas causam distorções negligenciáveis no padrão de velocidade de sólidos em um CFB.

Uma breve e interessante descrição do método não-intrusivo que utiliza a técnica de tomografia computadorizada é dada por WARSITO *et al.* (1999). Os autores ilustram sua aplicação em uma coluna de bolhas e lama (*slurry bubble column*) no intuito obter estruturas de distribuição de concentrações de bolhas de gás e partículas sólidas na coluna. O mecanismo de concentração de partículas juntamente com o efeito da velocidade de gás, carga de sólidos e diâmetro de partículas são discutidos.

A técnica de traçadores fosforescentes foi utilizada, dentre outros, por DU e WEI (2002) para estudar o efeito de algumas propriedades de partículas, incluindo tamanho, densidade e esfericidade, sobre o comportamento de mistura na lateral de um reator *riser* utilizando como material fluidizante, partículas de FCC (*fluidized catalytic cracking*).

Em relação à utilização da técnica de sonda de capacitância, destacam-se, dentre outros pesquisadores, JOHANSSON *et al.* (2004) e OLSON *et al.* (1995) na obtenção, dentre outras propriedades, da fração volumétrica de bolhas em um leito fluidizado borbulhante e HAGE *et al.* (1997) na medida do padrão de escoamento de sólidos em combustores de leito fluidizados industriais e de bancada.

Outro tipo de técnica não-intrusiva, a qual não é citada nas Tabelas 2.1 e 2.2, e que foi utilizada por BARRI *et al.* (2004) na determinação de velocidade de bolhas, é a utilização de uma câmera de alta velocidade (*High Speed Video*). Esta técnica permite acompanhar o movimento de partículas em uma determinada região e determinar suas velocidades por meio de uma malha previamente calibrada sobre a região de interesse.

DUARTE *et al.* (2005) utilizaram, também, uma câmera de alta velocidade (velocidade máxima de 2000 frames/s) para medir perfis de velocidade de partículas em um leito de jorro bidimensional confeccionado em acrílico. Munidos desta câmera, o movimento das partículas foi acompanhado e gravado (a 500 frames/s). Com o auxílio de uma malha (de espaçamentos previamente estipulados) desenhada sobre a parede do leito de jorro e observando-se o número de frames que uma determinada partícula despendia ao transpor um determinado espaço, conhecido, nesta malha, foi possível o cálculo de sua velocidade.

A técnica utilizada nos estudos realizados neste trabalho para a medida de velocidades e concentrações de partículas em um sistema gás-sólido, é classificada como sendo intrusiva e utiliza como sonda de medida, fibras ópticas, como descrita a seguir.

2.1.3 – Sonda de Fibra Óptica

Cada vez mais vindo sendo investigada e aprimorada a utilização de sondas de fibras ópticas para a medida de velocidades e concentrações de sólidos em uma gama de diferentes equipamentos nos quais se encontram partículas em suspensão.

A sonda de fibra óptica é uma técnica intrusiva, relativamente simples, robusta e que promove, a depender de sua geometria, mínimos distúrbios para o campo de escoamento (HARTGE *et al.*, 1986).

Vale ressaltar que este tipo de sonda não se restringe apenas a aplicações em sistemas de transporte pneumático diluídos. Muitos investigadores vêm utilizando-as em sistemas contendo fases densas como, por exemplo, em leitos fluidizados (HORIO *et al.*, 1980; WERTHER, 1999), em leitos de jorro cônicos (OLAZAR *et al.*, 1998 e SAN JOSÉ *et al.*, 2005), em leitos de jorro cilíndricos (HE *et al.*, 1994) e em *jet spouted bed* (BARROZO *et al.*, 2010).

A estrutura de fibras ópticas varia pouco, porém existem diferentes tipos de arranjos ou configurações, a depender da função e do número de canais, para satisfazer diferentes requerimentos. A Figura 2.3 abaixo descreve algumas das várias diferentes configurações utilizadas na literatura.

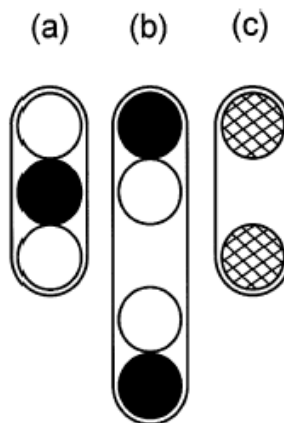


Figura 2.3 – Diferentes configurações utilizadas em sondas de fibras ópticas (ZHU *et al.*, 2001).

Os diferentes círculos denotados na Figura 2.3 acima indicam o tipo de função de cada um dos canais sendo que, o círculo branco (não preenchido), indica um canal que possui

a função de somente emitir luz; o círculo preto (completamente preenchido) indica um canal que possui a função de somente receber a luz enquanto que o círculo riscado possui tanto a função de emitir quanto a de receber luz.

Estas configurações têm sido adotadas por vários autores no intuito de melhorar a qualidade das medidas, sendo a configuração com o índice: (a) por QIN e LIU (1982); SAN JOSÉ *et al.*(2005); OLAZAR *et al.*(1998); (b) por OKI *et al.* (1975; 1977; 1980), HORIO *et al.* (1988), YANG *et al.* (1993) e a configuração (c) por HARTGE *et al.* (1988), MILITZER *et al.* (1992) e BARROZO *et al.*(2010).

O tipo de configuração da sonda empregada nos estudos deste trabalho classifica-se, com base na Figura 2.3, como configuração com o índice (c), ou seja, os canais utilizados, os quais são dois, tanto emitem quanto recebem luz refletida pelas partículas.

2.1.4 – Conceito de Função de Correlação Cruzada na medida de Velocidade de Partículas

O princípio de análise e processamento de dados utilizado por uma sonda de fibra óptica, com o propósito final de calcular a velocidade de partículas é baseado na função de correlação cruzada dos sinais provenientes dos canais que a compõem.

O conceito de correlação originou-se na antiguidade onde se comparavam padrões, fazendo-se deslizar um padrão sobre o outro. A função de correlação pode ser utilizada para detectar a presença de um rosto em uma multidão, para comparar impressões digitais ou padrões de vasos sanguíneos da retina para identificar pessoas e para determinar que arma disparou um projétil mesmo que ele esteja amassado ou parcialmente derretido. É usada também em radares, no sistema GPS (*Global Positioning System*) e na análise de DNA.

A utilização da técnica de correlação cruzada, no que diz respeito à investigação do comportamento fluidodinâmico, surgiu na mecânica dos fluidos baseado nos conceitos introduzidos por TAYLOR (1938) seguindo-se por TOWNSEND (1947).

Na comparação entre dois sinais, a função de correlação cruzada atinge seu valor máximo para um retardo que corresponde ao intervalo de tempo de chegada de um sinal que lembra a réplica armazenada, sendo representada pela Equação 2.1 abaixo.

$$R_{xy}(p) = \frac{1}{N-p} \sum_{i=0}^{N-p} x(i)y(i+p) , \text{ com } p = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

Sendo,

R_{xy} = valor normalizado da função de correlação cruzada, [-];

N = quantidade de dados coletados por cada um dos canais, [-];
 $x(i)$ = corresponde ao vetor posição i dos dados originados no canal 1 (CH1), [-];
 $y(i)$ = corresponde ao vetor posição i dos dados originados no canal 2 (CH2), [-];
 p = número de deslocamentos (ou deslizamentos) sobre as posições dos dados, [-];
 $x(i)y(i + p)$ = produto de superposição, [-].

Através da Equação 2.1 acima observa-se que, o “ponteiro”, representado por $x(i)$, indica a posição dos dados coletados pelo canal CH1 armazenados em um vetor de N posições, sendo o índice “ i ” o variador de posições dentro deste vetor.

Este canal é dito “canal de sinal recebido”, o qual será comparado com o canal de sinal armazenado, neste caso o canal CH2.

O “ponteiro” para os dados armazenados no canal CH2 é representado por $y(i+p)$, pois este, dito “canal de sinal armazenado”, irá se deslizar sobre os dados armazenados pelo canal CH1, sendo este deslizamento controlado pelo índice “ p ” que varia de 0 (onde não ocorreu ainda nenhum deslizamento de dados) até $N-1$ (quando um vetor de dados se deslizou totalmente sobre o outro). Não se deve confundir quanto à função dos dois canais, pois, ambos emitem, recebem sinais e os armazenam, sendo que, a única diferença é que os dados coletados e armazenados pelo CH2 são os que deslizam sobre os dados captados pelo CH1.

Como exemplo, considere as duas sequências de dados hipotéticos abaixo, sendo que, cada sequência foi gerada em um canal:

1 2 3 4 | 5 | 6 | (Sequência gerada no CH1)
 | 1 | 2 | 3 4 5 6 (Sequência gerada no CH2)

O somatório do produto de superposição do caso hipotético acima seria: $5x1+6x2 = 17$, sendo que este valor ainda não foi normalizado. Observar que os dados acima são ditos hipotéticos pelo fato de não serem binários (pois os dados armazenados, após o conversor A/D são, necessariamente, binários) e pelo fato de as duas sequências armazenadas de dados serem idênticas (pois os sinais podem conter algum tipo de ruído e, desta forma, serem levemente diferentes mesmo que vindos da mesma fonte de geração).

Obviamente, o maior valor do somatório do produto de superposição acontece quando uma sequência está sobre a outra, isto é, possui o mesmo deslocamento para a direita. À medida que os dados armazenados no CH2 deslocam-se pelo sinal recebido no CH1, o somatório do produto de superposição é calculado, normalizado e plotado para cada

deslocamento, ou seja, para cada valor de p , constituindo-se assim uma curva de correlação cruzada como mostrada, de forma ilustrativa, na Figura 2.4.

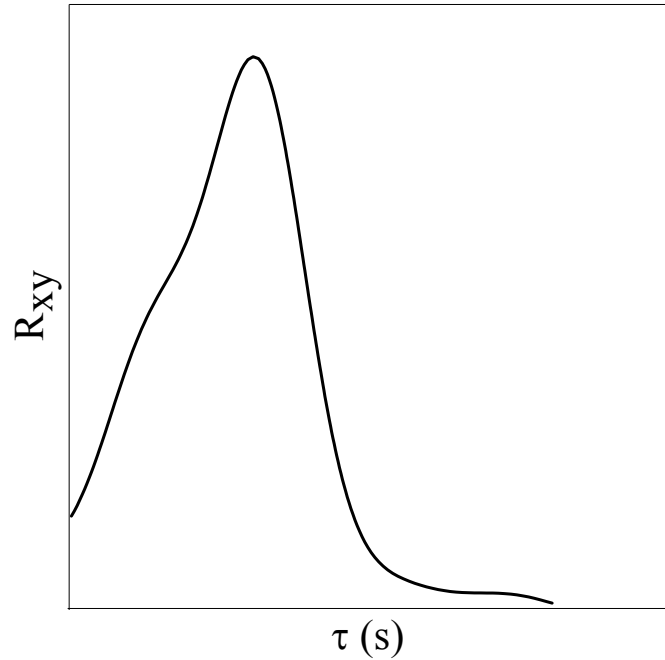


Figura 2.4 - Função de Correlação Cruzada.

O tempo de deslocamento, o qual compõe o eixo das abscissas na figura anterior, refere-se ao tempo gasto em cada deslocamento de dados. Logo, o tempo de deslocamento pode ser expresso como uma função do número de deslocamento e da frequência de amostragem, como mostrado abaixo.

$$\tau = \frac{p}{f} \quad (2.2)$$

Sendo,

τ = tempo de deslocamento [$M^0L^0T^1$];

p = número de deslocamentos [-];

f = frequência de amostragem [$M^0L^0T^{-1}$].

Note-se que o valor máximo da função de correlação cruzada ocorre no deslocamento que corresponde ao instante de chegada da borda precedente do sinal recebido.

O valor máximo da função de correlação cruzada é uma medida da semelhança entre o sinal recebido e a réplica armazenada, ou seja, o valor igual a 1 corresponderia a uma coincidência perfeita.

Desta forma, o tempo necessário para que uma partícula alcance o canal CH2 vinda do canal CH1, separados por uma distância (De) conhecida, é baseado no valor máximo da função de correlação cruzada e pode ser expresso através da Equação 2.3 abaixo.

$$\tau_{\max} = \frac{p_{\max}}{f} \quad (2.3)$$

Sendo,

$\tau_{\max}$ = tempo gasto para transpor os dois canais, $[M^0L^0T^1]$;

$p_{\max}$ = número de deslocamentos na posição dos dados que foi necessário para se alcançar o máximo valor da função de correlação cruzada, [-];

f = frequência de amostragem, $[M^0L^0T^{-1}]$.

Sabendo-se o valor da distância efetiva entre os canais que compõem a sonda, a velocidade da partícula é calculada como segue.

$$v_p = \frac{De}{\tau_{\max}} \quad (2.4)$$

Sendo,

De = distância efetiva entre os dois canais, $[M^0L^1T^0]$;

v_p = velocidade da partícula, $[M^0L^1T^{-1}]$.

2.1.5 - Técnicas de tratamento Estatístico dos Dados de Correlação Cruzada

A sonda de fibra óptica não pode ser utilizada para obter informações sobre o comportamento de partículas individuais. Ao invés disto, o comportamento dinâmico de grupos de partículas, tais como concentrações e velocidades, pode ser medido pelo sistema de fibras ópticas. Isto é devido ao fato de que, o volume de controle o qual detecta as partículas é muito grande comparado ao tamanho da partícula e sempre contém “nuvens” de partículas.

Consequentemente, a informação obtida pela sonda de fibra óptica representa o comportamento de uma coleção de partículas presentes no volume detector.

Visto que não é viável (computacionalmente) calcular a função de correlação cruzada usando todo o conjunto de dados sobre certo período de tempo, os dados são “quebrados” em

pequenos segmentos (ou blocos de dados) e cada segmento é utilizado no cálculo de uma função de correlação cruzada (HARUN, 2010).

Medidas cuidadosas devem ser tomadas, em relação à precisão dos dados, quando da escolha do valor da frequência de amostragem e do comprimento dos blocos de dados, pois cada bloco de dados contribui com uma função de correlação na média geral.

Medidas de velocidade instantâneas de sólidos usando sonda de fibras ópticas são sujeitas a discussões por causa da limitação da frequência de amostragem de dados e do efeito da média da função de correlação cruzada no cálculo da velocidade, logo, sua utilização é mais bem empregada para o cálculo de médias radiais de velocidades e de concentrações de partículas (HARUN, 2010).

Embora a técnica de correlação cruzada se restrinja ao cálculo de médias radiais, existem reportados na literatura algumas modificações nesta técnica, possibilitando o cálculo de velocidades e concentrações de sólidos instantâneos (NICOLAI e REH, 1995).

Com a introdução, agora, do conceito de blocos de dados, podemos classificar como média local a média dos pontos de cada um dos blocos e como média global a média de todos os dados, ou seja, de todos os blocos.

Os tratamentos estatísticos utilizados pela função de correlação cruzada para calcular a velocidade média local são descritos a seguir:

❖ Tratamento 1 : Cálculo da velocidade média local a partir da curva de correlação média

Neste caso, o cálculo das velocidades médias das partículas é realizado por meio do tempo de deslocamento correspondente ao valor máximo da curva de correlação média, sendo que, a curva de correlação média é obtida através da média aritmética dos coeficientes de correlação cruzada, para cada deslocamento de dados, de cada um dos blocos de dados.

A Figura 2.5 descreve a obtenção da curva de correlação média tendo como base os grupos de dados.

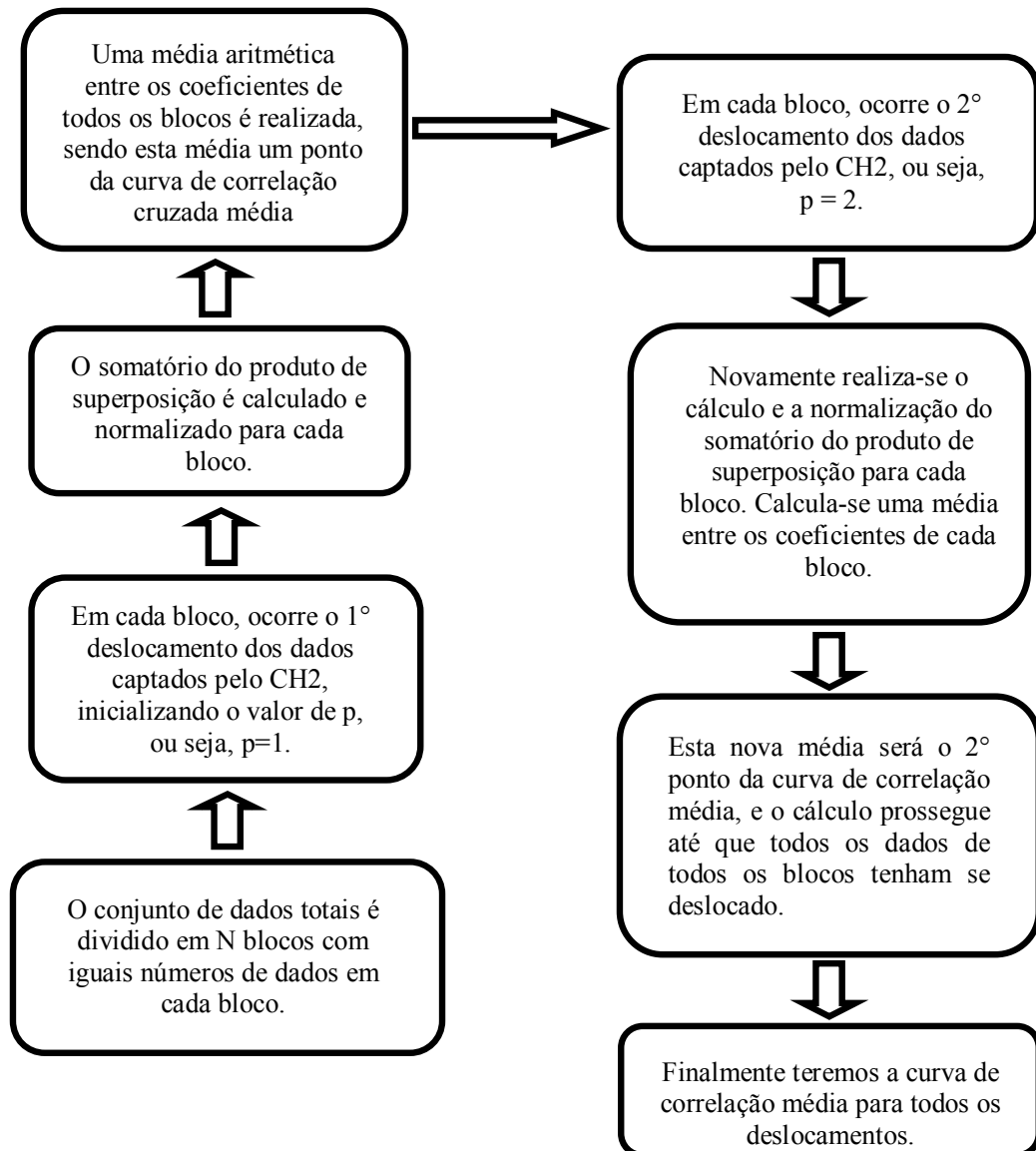


Figura 2.5 – Descrição do Tratamento 1 de cálculo da velocidade média local utilizando sonda de fibra óptica.

Tendo-se, desta forma, a curva de correlação média, pode-se inferir quantos deslocamentos (ou deslizamentos) de dados foram necessários para atingir um coeficiente de correlação médio máximo. Com este valor, juntamente com a frequência previamente escolhida, podemos utilizar a Equação 2.3 para calcular o tempo médio que uma determinada partícula gastou para transpor os canais. Consequentemente, a partir da Equação 2.4, a velocidade média local pode ser calculada.

❖ **Tratamento 2: Cálculo da velocidade média local a partir da média das velocidades de cada bloco de dados**

Neste caso, a técnica de correlação cruzada é aplicada bloco por bloco, obtendo-se desta forma, uma curva de correlação cruzada para cada bloco individual e, aplicando-se as equações anteriores, calculam-se as velocidades em cada um dos blocos. Logo, ao invés de um único valor de velocidade de partículas, obtêm-se uma distribuição de velocidades como ilustrado na Figura 2.6 onde foram utilizados, para exemplificação, 32 blocos ou grupos de dados, cada um contendo 4096 dados.

Este procedimento tem também grande aplicação quando da medida de um escoamento transiente e oscilatório ou se alguma medida relativa do nível de turbulência é desejada.

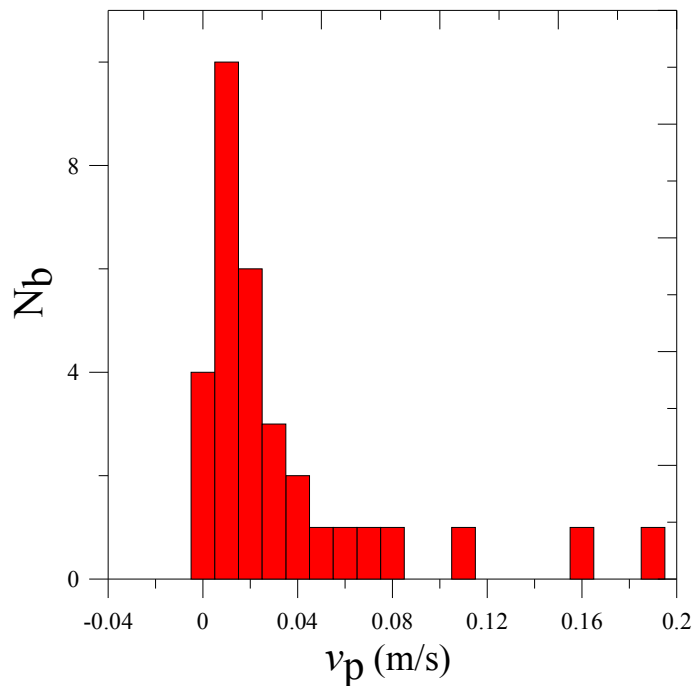


Figura 2.6 - Distribuição de Velocidades.

A Figura 2.7 a seguir descreve a obtenção da velocidade média local a partir das velocidades de cada um dos blocos utilizando-se do Tratamento 2.

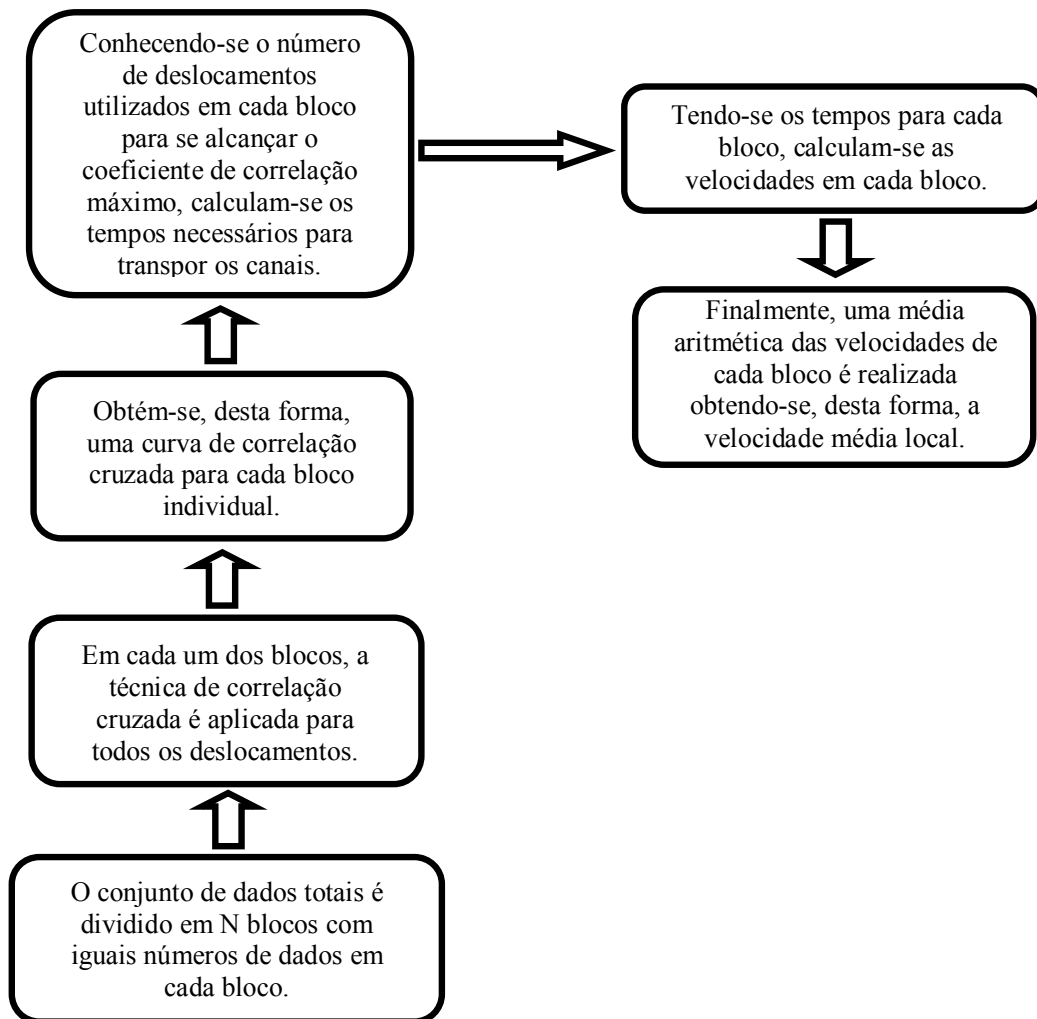


Figura 2.7 – Descrição do Tratamento 2 de cálculo da velocidade média local utilizando sonda de fibra óptica.

No mínimo, o tamanho do bloco deve ser grande o suficiente para amenizar muitos eventos fortes passando através dos sensores. À medida que o tamanho de blocos diminui, uma tendência nos dados é observada. Geralmente, um tamanho de bloco de 5 a 10 vezes o tempo de atraso a ser medido é uma boa escolha (BARRI *et al.*, 2004).

A melhor maneira de confirmar o tamanho de blocos adequado é realizar uma série de medidas para verificar se ocorre uma tendência dos dados em um tamanho de blocos desejado.

2.1.6 – Utilização da Sonda de Fibra Óptica na Medida de Porosidade

É largamente reconhecido que para um melhor entendimento das propriedades do escoamento e do comportamento de sistemas multifásicos, tais como um leito de jorro, é de suma importância conhecer detalhes de tais escoamentos.

Dentre muitas variáveis, a distribuição local de fração volumétrica de sólidos, particularmente em suspensões gás-sólidos, tem recebido considerável atenção, possivelmente

por causa de suas peculiaridades e efeitos determinantes sobre o fenômeno de transferência (AMOS *et al.*, 1996).

Das várias técnicas utilizadas para a medida de porosidade local, a sonda de fibra óptica vem se destacando devido a sua simplicidade e custo relativamente baixo. Seu princípio de funcionamento baseia-se nas seguintes etapas: a sonda ilumina um pequeno volume de partículas e mede a intensidade de luz refletida a qual está relacionada à concentração volumétrica dentro de tal volume; a luz refletida é então convertida em impulsos elétricos e integrados no tempo, desta forma uma medida quantitativa da concentração local de sólidos é alcançada com uma calibração adequada.

Porém, o maior problema encontrado com sondas de fibras ópticas utilizadas na medida de porosidade é com relação às suposições aplicadas em sua calibração. A precisão da medida é fortemente dependente da precisão da técnica de calibração utilizada.

Segundo ZHANG *et al.* (1998), os trabalhos sobre calibração de sondas de fibras ópticas são normalmente divididos em duas categorias: calibrações lineares e calibrações não-lineares.

A calibração linear assume, como o próprio nome o diz, uma relação linear entre a intensidade do sinal de voltagem captado pelo canal da sonda e a concentração de sólidos presentes no volume de medida. Logo, somente duas medidas de sinais de voltagem são requeridas, para porosidades conhecidas, para alcançar uma calibração precisa (QIN e LIU, 1982; MATSUNO *et al.*, 1983; BOIARSKI, 1985).

Vários autores utilizaram-se, com sucesso, desta técnica de calibração na medida de perfis de porosidade em leitos de jorro cilíndricos (HE *et al.*, 1994) e em leitos de jorro cônicos (OLAZAR *et al.*, 1998 e SAN JOSÉ *et al.*, 2005).

Um fato importante reportado na literatura neste tipo de calibração é que, para compensar as alterações nas características do sistema eletrônico, o sistema de sondas necessita ser fixado com o valor de 0 V correspondendo ao leito vazio e o fundo de escala correspondendo ao leito empacotado, o que implica as seguintes dificuldades: é difícil manter exatamente a mesma concentração de sólidos para o leito empacotado de tempos em tempos e a concentração de sólidos real de um leito empacotado depende da maneira com que os sólidos são empacotados e o desvio da concentração de sólidos pode ser significativo (ZHANG *et al.*, 1998).

Já a calibração não-linear necessita do ajuste aos dados de uma função que represente a variação da porosidade frente a uma mudança na intensidade do sinal medido pela sonda. Logo, além dos dados extremos de porosidade *versus* intensidade do sinal, o conhecimento

dos dados intermediários é necessário.

A utilização desta técnica de calibração na medida de porosidade em sistemas gás-sólidos depara-se com a grande dificuldade de se obter suspensões estáveis de sólidos em gases impossibilitando, desta forma, a fixação de um valor de concentração conhecido.

Na tentativa de superar estas dificuldades alguns autores utilizaram de medidas indiretas de porosidade em sistemas líquido-sólidos (HARTGE *et al.*, 1988; BERGOUGNOUX *et al.*, 1999) ou utilizando-se de simulações numéricas da resposta do sensor através do cálculo de Monte Carlo (BERGOUGNOUX *et al.*, 1996; LISCHER e LOUGE, 1992).

Devido à diferença no índice de refração entre a fase gás e líquida a validade de tal calibração para suspensões gasosas é questionável (AMOS *et al.*, 1996).

Outras tentativas têm sido realizadas, como por exemplo, MATSUNO *et al.* (1983), em que os autores utilizaram-se do derramamento de sólidos por meio de uma peneira vibratória na obtenção de valores conhecidos de concentração de sólidos por meio do fluxo mássico. Porém, o método mostrou-se limitado a baixas frações volumétrica de sólidos e sujeito a incertezas.

Já WANG (2006), utilizou-se de uma mistura contendo algumas partículas previamente coloridas para a calibração da sonda de fibras ópticas. O autor assumiu que a intensidade de voltagem era proporcional à fração de partículas coloridas presentes no meio.

2.2 - Abordagem Numérica

Esta seção tem o intuito de apresentar as abordagens utilizadas em um escoamento multifásico, conceitos utilizados na teoria cinética do escoamento granular juntamente com suas equações constitutivas, obtenção da distribuição de tensões nas diferentes fases e uma breve explanação dos tipos de malhas e métodos numéricos utilizados.

2.2.1 - Escoamento Multifásico

Um escoamento multifásico aparece quando o movimento médio de um material é essencialmente diferente de outros que o suportam, havendo desta forma, uma grande interação entre eles. A influência de uma fase sobre a outra causará uma modificação profunda na fluidodinâmica do escoamento.

O interesse maior no estudo de um escoamento multifásico é com relação ao comportamento médio do sistema, ou seja, a solução da equação do movimento para o

movimento de uma única partícula é geralmente inadequado para concluir sobre as tendências do sistema (DARTEVELLE, 2003).

Para modelar um sistema multifásico, é necessário levar em consideração a conservação das propriedades envolvidas para ambas as fases assim como contabilizar a interação entre elas. Consequentemente, um modelo multifásico apropriado deve ser adotado.

Duas aproximações são normalmente encontradas na literatura: a aproximação Euler-Lagrange e a aproximação Euler-Euler.

Na aproximação Euler-Lagrange, resolve-se primeiramente as equações médias de Navier-Stokes para a fase fluida separadamente da fase considerada dispersa (fase que ocupa menor fração volumétrica). Após este, a fase dispersa é “lançada” sobre o campo de velocidades calculado. A grande suposição desta aproximação é a de que a concentração da fase dispersa é tão pequena que não causará perturbação ao campo de velocidades calculado para a fase contínua.

KAWAGUCHI *et al.* (2000) utilizaram-se desta aproximação na obtenção numérica de perfis de velocidade de sólidos em um leito de jorro baseando-se nos dados experimentais de HE *et al.* (1994). Os autores realizaram simulações bidimensionais para o movimento do fluido e tridimensionais para o movimento das partículas, obtendo resultados qualitativamente de acordo com o experimental.

Utilizaram-se, também, desta aproximação, LIMTRAKUL *et al.* (2004) na análise numérica da decomposição do ozônio sobre um catalisador óxido em um leito de jorro valendo-se, para tanto, de dados experimentais de ROVERO *et al.* (1983), obtendo resultados numéricos satisfatórios quando comparados ao experimental.

Finalmente, a aproximação Euler-Euler, trata as fases, independentemente de suas composições e características físicas, como fluidas e interpenetrantes, introduzindo, desta forma, o conceito de fração volumétrica. Desta forma, as equações de conservação, contendo as mesmas estruturas, são aplicadas para ambas as fases.

Dentro da aproximação Euler-Euler destaca-se a Modelagem Euleriana Granular Multifásica, a qual é bastante difundida na literatura na modelagem de sistemas particulados, como por exemplo, leitos de jorro e leitos fluidizados.

DUARTE *et al.* (2005) e DU *et al.* (2006) utilizaram desta abordagem na simulação bidimensional de perfis de velocidade e de porosidade em um leito de jorro, as quais foram comparadas com dados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994). Para o cálculo da distribuição de tensões na fase granular, viscosidade granular e pressão de sólidos, utilizaram da teoria cinética do escoamento granular desenvolvida por LUN *et al.* (1984).

SZAFRAN e KMIEC (2004) realizaram simulações bidimensionais na previsão da taxa de transferência de massa e energia em um leito de jorro utilizado como secador. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais de KMIEC e SZAFRAN (2000), mostrando-se satisfatórios.

Dentre estes, vários outros autores têm adotado este tipo de modelagem em leitos de jorro conseguindo com isto resultados satisfatórios, tais como, HUILIN *et al.*(2001, 2004); LU *et al.*(2004); ZHONGHUA e MUJUMDAR (2008); DUARTE *et al.* (2009); SHUYAN *et al.* (2009); DAN *et al.*(2010) e WANG *et al.*(2010).

Em virtude da importância destes resultados, o modelo multifásico adotado neste trabalho foi o Modelo Euleriano Granular Multifásico (MEGM), cujo desenvolvimento é assunto para os próximos tópicos.

2.2.2 – Conservação das Propriedades em um Escoamento Multifásico e Modelos de Arraste

Baseada na modelagem Euleriana Granular Multifásica, a Equação 2.5 descreve, de uma forma geral, a conservação da massa podendo, o índice geral “n”, ser substituído por “s” (fase sólida ou granular) ou “f” (fase fluida).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_n \rho_n) + \nabla \cdot (\varepsilon_n \rho_n \vec{v}_n) = 0 \quad (2.5)$$

Sendo,

ρ_n = densidade da fase n, $[M^1 L^{-3} T^0]$;

ε_n = fração volumétrica da fase n, $[-]$;

$\vec{v}_n$ = vetor velocidade para a fase n, $[M^0 L^1 T^{-1}]$.

De forma semelhante, a equação de conservação da quantidade de movimento pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_n \rho_n \vec{v}_n) + \nabla \cdot (\varepsilon_n \rho_n \vec{v}_n \vec{v}_n) = -\varepsilon_n \nabla P_n + \nabla \cdot \vec{\tau}_n + \varepsilon_n \rho_n \vec{g} + \vec{f}_{arraste}$$

Sendo,

P_n = pressão exercida pela fase n, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$;

$\vec{f}_{arraste}$ = força de interação entre as fases, $[M^1L^1T^{-2}]$;

$\vec{g}$ = gravidade, $[M^1L^1T^{-2}]$;

$\vec{\tau}_n$ = tensor tensão da fase n, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

A força de arraste tem a função de interligar as fases existentes em um escoamento multifásico contabilizando, assim, a interação entre as mesmas.

Esta força pode ser escrita, de uma forma geral, como sendo:

$$\vec{f}_{arraste} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \rho_f}{d_p} |\vec{v}_f - \vec{v}_s| f(\varepsilon_f) (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (2.7)$$

Sendo,

C_D = coeficiente de arraste;

$|\vec{v}_f - \vec{v}_s|$ = módulo da diferença entre os vetores velocidades das fases, $[M^0L^1T^{-1}]$;

$(\vec{v}_f - \vec{v}_s)$ = diferença vetorial entre os vetores velocidade das fases, $[M^0L^1T^{-1}]$;

$f(\varepsilon_f)$ = função que depende do modelo de arraste adotado.

Normalmente a maioria dos termos presentes na equação acima são englobados em um único termo β , denominado de coeficiente de troca entre as fases, como mostrado abaixo:

$$\vec{f}_{arraste} = \beta (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (2.8)$$

Existem várias maneiras de estimar o valor de β a depender do modelo de arraste adotado na modelagem do escoamento multifásico.

Visto que a força de arraste é uma força de aceleração essencial no “acoplamento” das fases gás-sólido, a escolha do modelo de arraste possui grande influência nos resultados simulados (DU *et al.*, 2006).

DU *et al.* (2006) e GRYCZKA *et al.* (2009) investigaram a utilização de vários modelos de arraste nas simulações de um leito de jorro, destacando-se, dentre outros, os modelos desenvolvidos por SCHILLER e NAUMANN (1935), RICHARDSON e ZAKI (1954), CLIFT *et al.* (1978), SYAMLAL e O'BRIEN (1988), ARASTOPOUR *et al.* (1990), GIDASPOW *et al.* (1992), etc.

2.2.3 – Distribuição de Tensão na Fase Fluida

Ao se observar a equação de conservação da quantidade de movimento para a fase “n” (Equação 2.6), nota-se que é essencial, para a análise de um escoamento multifásico, o conhecimento da distribuição das tensões viscosas (forças de superfície) que agem sobre um determinado volume de fluido ou grãos.

Qualquer fluido quando posto em movimento exibe evidências da existência de um atrito interno o qual tende a homogeneizar, ou transferir, o movimento vindo de camadas de fluido superiores por todo o volume, sendo a causa deste “atrito” devido à presença da viscosidade.

A Figura 2.8 abaixo ilustra a transferência de quantidade de movimento entre camadas finas de fluido, sendo o comprimento das setas, o indicador da magnitude do vetor velocidade.

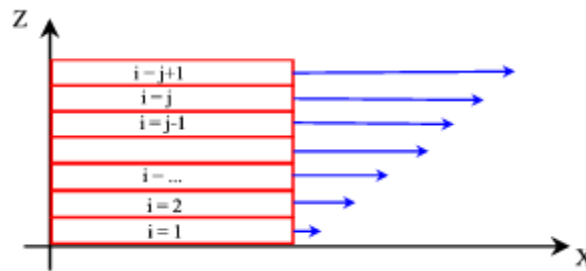


Figura 2.8 – Transferência de quantidade de movimento entre camadas de fluido (DARTEVELLE, 2003).

Considera-se que as camadas de fluido apresentadas na figura acima são finas o suficiente para que o seu movimento assemelhe-se ao de um corpo rígido, ou seja, não existindo velocidades relativas entre as moléculas pertencentes a uma dada camada.

A força aplicada na superfície da camada mais superior do fluido dá origem, baseando-se na lei da ação e reação, a uma outra força de mesma intensidade, porém em sentido contrário, denominada de tensão de cisalhamento, que existe somente devido às forças de coesão do fluido com as paredes da placa e entre as camadas de fluidos.

Esta distribuição de tensões no interior do fluido dá origem ao gradiente de velocidade ou à distribuição de velocidades, a qual caracteriza o escoamento de um determinado fluido, sendo desta forma, a relação entre a tensão viscosa e o gradiente de velocidade de suma importância na previsão do comportamento.

As forças que agem sobre um determinado volume de fluido são classificadas em: forças de campo, as quais agem sem que haja necessariamente contato com o volume de

fluido, por exemplo, força gravitacional e força magnética, e forças de superfícies ou tensões, as quais agem por meio de um contato direto com o volume de fluido. Por outro lado, as tensões ou forças de superfície são classificadas em normais e cisalhantes de acordo com a direção da normal à superfície de aplicação da força e a direção da força (BIRD *et al.*, 1960).

A Figura 2.9 ilustra os tipos de tensões que podem atuar em um determinado volume de fluido.

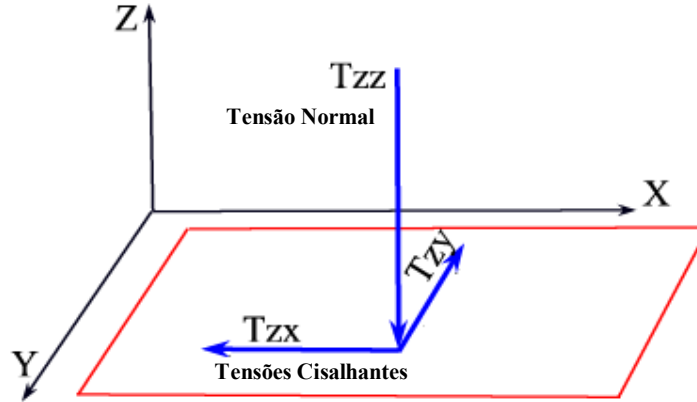


Figura 2.9– Classificação do tensor tensão (DARTEVELLE, 2003).

Nota-se, a partir da figura acima que, os tensores de índices iguais se classificam em tensões normais enquanto os que possuem índices diferentes se classificam em tensões cisalhantes. Vale ressaltar também que, o primeiro índice se refere à direção normal à superfície de aplicação da força enquanto o segundo índice se refere à direção da força.

Para fluidos como, por exemplo, ar (o qual foi utilizado neste trabalho) e água, suas reologias são muito bem descritas através de uma relação linear entre tensão e taxa de deformação. Esta relação é representada, de forma simplificada, em uma dimensão, através da Equação 2.9.

$$\tau_{zx} = -\mu \frac{dv_x}{dz} \quad (2.9)$$

Sendo,

τ_{zx} = tensão cisalhante, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;
 μ = viscosidade do fluido, $[M^1L^{-1}T^{-1}]$;

A equação acima é denominada de Lei de Newton para a viscosidade a qual assume que o “coeficiente de transporte” molecular depende somente do estado termodinâmico do material (i.e., temperatura, pressão, e densidade), mas não de seu “estado dinâmico” (i.e., o

estado de tensão e deformação). Os fluidos que se comportam desta forma são denominados de fluidos Newtonianos (DARBY, 2001).

Existem vários outros modelos reológicos para os mais diversos tipos de fluidos nos quais suas viscosidades dependem da tensão aplicada, porém estes se encontram fora do escopo deste trabalho.

É importante notar que o sinal negativo na equação acima denota o fato de que o fluxo de quantidade de movimento é contrário ao gradiente de velocidade.

As simulações que serão realizadas neste trabalho são em 3D (três dimensões), logo, a forma simplificada da Lei da viscosidade de Newton dada pela equação anterior não será aqui de grande valia. Desta forma, a Lei da viscosidade de Newton em 3D, que leva em consideração tanto as tensões normais quanto as cisalhantes atuando em todas as possíveis direções de todas as superfícies de um dado volume de fluido infinitesimal, é apresentada pela Equação 2.10.

$$\vec{\tau}_{fluido} = -\mu^{bulk} \nabla \cdot \vec{v} I + 2\mu^{cisalhante} \left[D + \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.10)$$

E a taxa de deformação, dada por,

$$D = -\frac{1}{2} \left[\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right] \quad (2.11)$$

Sendo,

D = taxa de deformação, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

I = tensor unitário, $[-]$;

T = representação do operador “transposto” de matriz.

Sempre que houver uma taxa de deformação cisalhante, tem-se uma tensão cisalhante proporcional, onde a constante de proporcionalidade será a viscosidade cisalhante ($\mu^{cisalhante}$). Por outro lado, sempre que houver uma taxa de deformação volumétrica, tem-se uma tensão normal proporcional, onde a constante de proporcionalidade será a viscosidade *bulk* (μ^{bulk}). Para a maioria dos fluidos, a viscosidade *bulk* é aproximadamente ou igual a zero e o fluido é incompressível, o que é chamado, hipótese de Stokes (DARTEVELLE, 2003).

2.2.4 – Distribuição de Tensão na Fase Granular

Dentro de um escoamento contendo partículas ou grãos, dito escoamento granular, podem existir variações de concentrações de sólidos ao longo do espaço, por exemplo, em um leito de jorro onde a concentração de sólidos é menor na região de jorro (região de maior porosidade) e maior na região anular (região de menor porosidade). Consequentemente, na modelagem de um escoamento granular deve-se levar em conta esta não homogeneidade do escoamento e os vários efeitos intrínsecos a estas diferenças de concentrações de sólidos.

A Figura 2.10 ilustra um escoamento granular contendo uma grande faixa de concentrações de sólidos onde notam-se três principais regiões e suas respectivas formas de dissipação viscosa.

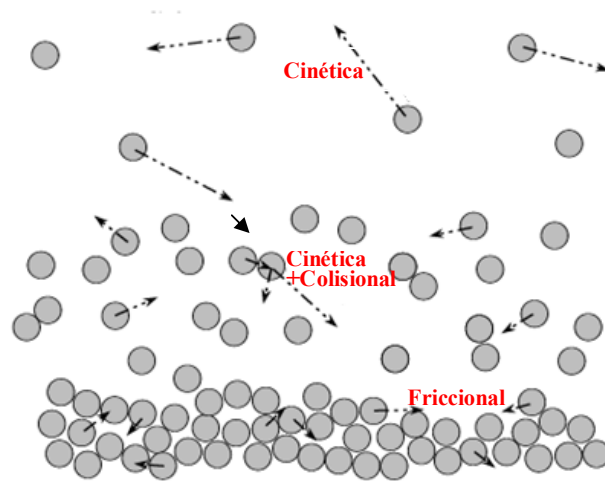


Figura 2.10 – Ilustração das três principais formas de dissipação viscosa dentro de um escoamento granular: cinética, cinética-colisional e friccional (DARTEVELLE, 2003).

Na região mais diluída do escoamento, as partículas apresentam um comportamento caótico onde se observam movimentos aleatórios. Esta região é caracterizada por apresentar uma dissipação viscosa devido somente ao movimento aleatório das partículas dita dissipação viscosa cinética. Logo, as tensões (forças de superfície as quais possuem sentido, módulo e duas direções) que agem e se distribuem sobre esta região são chamadas de tensões cinéticas.

Em uma região que apresenta uma concentração um pouco maior, nota-se a presença de outra forma de dissipação viscosa além da anteriormente citada. Aqui, as partículas, além de se movimentarem aleatoriamente, podem sofrer colisões instantâneas. A forma de dissipação viscosa causada pelas colisões entre as partículas é dita dissipação viscosa colisional e as tensões que agem e se distribuem nesta região são chamadas de tensões colisionais.

Por outro lado, quando o escoamento granular apresenta uma região de alta concentração de sólidos, ou seja, próximo ao limite máximo de empacotamento (concentrações volumétricas de sólidos maiores do que 50%), não se observam mais oscilações aleatórias das partículas ou colisões instantâneas mas, ao contrário, observam-se íntimos contatos e duradouros ao mesmo tempo que partículas começam a deslizar e atritar entre si. A forma de dissipação viscosa, de natureza totalmente diferente das anteriores, é dita dissipação viscosa friccional e as tensões que agem e se distribuem nesta região são chamadas de tensões friccionais.

2.2.5 – Tensor Tensão Total para a Fase Granular

Uma forma de combinar em um único tensor tensão total todos os tipos de tensões descritos no tópico anterior, que agem sobre um escoamento granular, foi proposta por SAVAGE (1983) como sendo uma simples relação linear de soma entre estes tensores (Equação 2.12).

$$\vec{\tau}_s = \vec{\tau}^{k/c} + \vec{\tau}^f \quad (2.12)$$

Sendo,

$\vec{\tau}_s$ = tensor tensão total da fase granular, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

$\vec{\tau}^{k/c}$ = tensor tensão cinético-colisional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

$\vec{\tau}^f$ = tensor tensão friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$.

O tratamento dado às contribuições cinética-colisional é baseado na teoria cinética dos gases (CHAPMAN e COWLING, 1970) adaptada para compor uma teoria que caracteriza o escoamento granular dita teoria cinética do escoamento granular iniciada por BAGNOLD (1954) e posteriormente desenvolvida por SAVAGE e JEFFREY (1981), JENKINS e SAVAGE (1983), SHAHINPOUR e AHMADI (1983) e LUN *et al.* (1984).

Por outro lado a contribuição friccional é definida utilizando-se da teoria do escoamento potencialmente plástico e da teoria do estado crítico baseadas na mecânica dos solos (JOHNSON e JACKSON, 1987; SRIVASTAVA e SUNDARESAN, 2003).

2.2.6 – Regimes de Escoamento Granular

Serão descritos neste tópico, separadamente, cada um dos tensores dominantes em um determinado regime do escoamento granular juntamente com suas equações constitutivas.

2.2.6.1 - Regime Friccional e Tensão Friccional

Em altas concentrações, ou seja, próximo ao limite máximo de empacotamento, o caminho médio livre entre as partículas tende a zero e, conseqüentemente, as mesmas não encontram espaço disponível para se movimentarem. Sendo assim torna-se desprezível a influência das tensões cinéticas neste escoamento. De forma similar, em virtude deste pequeno ou nenhum espaço disponível para o movimento das partículas, a probabilidade de colisões instantâneas desaparece, observando-se por outro lado um maior contato entre as partículas que agora possuem um comportamento íntimo de deslizamento umas sobre as outras. Desprezando-se, também, a influência das tensões colisionais, em virtude do exposto anteriormente, este tipo de regime de escoamento é dominado por uma distribuição de tensões friccionais.

Desta forma uma modelagem deste tipo de regime baseado na lei da mecânica friccional deve ser desenvolvida. As principais aproximações de tal escoamento granular friccional são feitas através da aplicação dos conceitos de plasticidade e estado crítico (HUILIN *et al.* 2004).

Uma simples formulação para o tensor tensão friccional, baseada na Lei de Newton, pode ser expressa pelas Equações 2.13 e 2.14.

$$\begin{aligned}\vec{\tau}^f &= P^f I - {}^{bulk}\mu^f \nabla \cdot \vec{u} I + 2\mu^f \left[D + \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \\ \Leftrightarrow \\ \vec{\tau}^f &= P^f I + 3 {}^{bulk}\mu^f \overset{\circ}{D} + 2\mu^f \overline{\overline{D}}\end{aligned}\tag{2.13}$$

E a taxa de deformação é dada por,

$$D = -\frac{1}{2} \left[\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right]\tag{2.14}$$

Sendo,

I = tensor tensão unitário, [-];

$\nabla \cdot \vec{u}$ = divergente do vetor velocidade, [M⁰L¹T⁻¹];

P^f = pressão friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

D = tensor taxa de deformação da fase sólida, $[M^0L^1T^{-1}]$;

$\overset{\circ}{D}$ = parte esférica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações associadas com a mudança de volume), $[M^0L^1T^{-1}]$;

$\overline{\overline{D}}$ = parte deviatorica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações cisalhantes), $[M^0L^1T^{-1}]$;

$^{bulk}\mu^f$ = viscosidades *bulk* friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

μ^f = viscosidade cisalhante friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

Dependendo da escolha do modelo matemático para o escoamento friccional, a viscosidade *bulk* na equação anterior pode assumir o valor zero, do contrário, ela é simplesmente uma função da viscosidade cisalhante.

Abaixo serão descritos algumas equações constitutivas, normalmente encontradas na literatura, para o cálculo das propriedades da fase sólida no regime friccional que compõem a equação anterior.

a) Viscosidade Cisalhante Friccional

A viscosidade cisalhante friccional é uma contribuição, originada do atrito e dos longos contatos entre as partículas, à viscosidade cisalhante total.

A teoria adotada pela mecânica dos solos para a viscosidade friccional é uma combinação da função de produção (*yield function*) e das leis do escoamento (LUNDBERG, 2008). Esta função de produção afirma que um material irá ceder a um movimento cisalhante se a tensão cisalhante friccional, atuando neste material, alcançar um determinado valor crítico. Por outro lado, as leis do escoamento são um conjunto de relações entre as componentes do tensor tensão e da taxa de deformação.

Normalmente, o limite de concentração de sólidos onde começa a tornar importante a contabilização da influência do regime friccional é de aproximadamente 50% (em volume) (DARTEVELLE, 2003).

A seguir são descritos dois modelos, dentre outros existentes na literatura, para o cálculo da viscosidade cisalhante friccional baseados na mecânica dos solos.

❖ **Modelo de SCHAEFFER (1987)**

O modelo proposto por SCHAEFFER (1987) é representado pela Equação 2.15 abaixo:

$$\mu^f = \frac{P^f \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (2.15)$$

Sendo,

μ^f = viscosidade cisalhante friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-1}]$;

P^f = pressão friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$;

ϕ = ângulo de fricção interna ou ângulo de repouso do material, $[-]$;

I_{2D} = segundo invariante do tensor tensão, $[M^0 L^0 T^{-2}]$.

Observa-se que quando o ângulo de fricção interna tende a zero, a viscosidade friccional tende, também, a zero. Este ângulo é função somente do material, possuindo um pequeno valor nos casos em que as partículas são grandes, arredondadas e de superfícies suaves. Tipicamente possui valores da ordem de 15° a 50° .

A Figura 2.11 ilustra a determinação do ângulo de fricção interna para uma determinada amostra de sólidos.

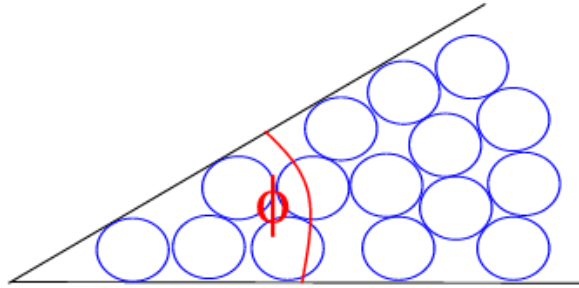


Figura 2.11 – Determinação do ângulo de fricção interna (DARTEVELLE, 2003).

Já o segundo invariante do tensor tensão, o qual é relacionado à tensão cisalhante, pode ser descrito como na equação abaixo (Equação 2.16):

$$I_{2D} = \frac{1}{6} \left[(D_{s11} - D_{s22})^2 + (D_{s22} - D_{s33})^2 + (D_{s33} - D_{s11})^2 \right] + D_{s12}^2 + D_{s23}^2 + D_{s31}^2 \quad (2.16)$$

Sendo que o índice,

- 1 – representa a coordenada x no espaço;
- 2 – representa a coordenada y no espaço;
- 3 – representa a coordenada z no espaço.

A forma geral para as componentes do tensor taxa de deformação é dada abaixo (Equação 2.17).

$$D_{s,ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{s,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{s,j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.17)$$

Sendo,

$D_{s,ij}$ = componente do tensor taxa de deformação, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;;

$u_{s,}$ = componente do vetor velocidade, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

❖ Modelo de JOHNSON e JACKSON (1987)

JOHNSON e JACKSON (1987) proporam um modelo que relaciona as forças normais às forças cisalhantes (Equação 2.18).

$$\mu^f = P^f \tan \phi \quad (2.18)$$

Sendo,

μ^f = viscosidade granular friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-1}]$;

P^f = pressão friccional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$;

ϕ = ângulo de fricção interna ou ângulo de repouso do material, [-];

b) Pressão Friccional

Em uma analogia com a pressão “termodinâmica”, a pressão de sólidos pode ser pensada como uma força por unidade de área, exercida por partículas, sobre uma dada superfície em um escoamento granular. Em adição às forças transmitidas devido aos impactos de curta duração, há, também, a possibilidade de transmissão de forças via contatos de longa duração (friccional). Neste último caso, a pressão de partículas reflete as forças exercidas ao longo dos pontos de contato.

A seguir são descritos três modelos, dentre outros, existentes na literatura, para o cálculo da pressão friccional.

❖ **Modelo de JOHNSON *et al.*(1990)**

JOHNSON *et al.* (1990) propuseram, também, um modelo para o cálculo da pressão friccional baseado em observações experimentais os quais mostraram que a pressão friccional aumenta rapidamente com o aumento da fração volumétrica de sólidos (Equação 2.19).

$$P^f = F \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\min})^n}{(\varepsilon_{S,\max} - \varepsilon_S)^p} \quad (2.19)$$

Sendo,

P^f = pressão friccional, $[M^1L^{-1}T^{-2}]$;

ε_S = fração volumétrica de sólidos, [-];

$\varepsilon_{S,\min}$ = valor limite de fração volumétrica de sólidos onde começa a tornar-se importante as influências friccionais, [-];

$\varepsilon_{S,\max}$ = limite máximo de empacotamento, [-].

OCONE *et al.* (1993) proporam, como valores para os parâmetros F , n e p , 0,05, 2 e 5, respectivamente.

O coeficiente F foi modificado a fim de descrevê-lo como sendo uma função da fração volumétrica de sólidos (Equação 2.20).

$$F = 0,1\varepsilon_S \quad (2.20)$$

❖ **SYAMLAL *et al.* (1993)**

O modelo proposto por SYAMLAL *et al.* (1993), é basicamente um modelo do tipo lei de potências ou *power law*, descrito pela Equação 2.21 a seguir.

$$P^f = A(\varepsilon_S - \varepsilon_{S,\min})^j \quad (2.21)$$

Sendo os valores dos parâmetros A e j iguais a 10^{25} e 10, respectivamente.

❖ *Based-KTGF*

Neste tipo de modelagem, a pressão friccional é definida com base na teoria cinética do escoamento granular, sendo que ela pode tender a grandes valores quando próximo do limite máximo de empacotamento, a depender do modelo selecionado para a função de distribuição radial (DING e GIDASPOW, 1990).

Na modelagem *Based-KTGF* (*Kinetic Theory of Granular Flow*), a pressão friccional se torna igual à pressão de sólidos.

2.2.6.2 - Regime Cinético-Colisional e Tensão Cinética-Colisional

O regime cinético-colisional é modelado através de uma profunda analogia com a teoria cinética dos gases (CHAPMAN e COWLING, 1970), baseando-se no fato de que, se as partículas podem mover-se aleatoriamente no escoamento e, conseqüentemente, estarem sujeitas a uma flutuação em seu movimento assim como as moléculas em um gás, a mesma demonstração feita na teoria cinética dos gases pode ser aplicada para o escoamento granular.

Logo, a substituição das moléculas por partículas dá origem à teoria cinética do escoamento granular (LUN *et al.*, 1984).

Consequentemente, esta associação permite definir para um dado componente sólido todas as propriedades físicas pertencentes a qualquer gás, ou seja, viscosidade cisalhante, viscosidade *bulk*, pressão, temperatura, tensor tensão viscosa, caminho médio livre etc.

Este movimento caótico dos grãos pode existir em baixas concentrações volumétricas de sólidos (devido ao atrito entre o gás e as partículas, a turbulência do gás, a variação de pressão no fluido etc.) ou em concentrações maiores (devido à colisão entre os grãos) (DARTEVELLE, 2003).

Uma das principais diferenças entre estas duas abordagens da teoria cinética é que as colisões, no caso do escoamento granular, são inelásticas, ocorrendo, desta forma, perda de energia.

A tensão cinética-colisional pode ser vista como uma tensão viscosa pura (dinâmica) devido à transferência de quantidade de momentum durante o movimento aleatório dos grãos e em suas colisões. Ela é somente importante para escoamentos diluídos a altas taxas de deformações, ou seja, longe do limite máximo de empacotamento.

Da mesma forma como na definição do tensor friccional, o tensor cinético-colisional é baseado na Lei de Newton, expresso a seguir:

$$\begin{aligned}\vec{\tau}^{K/C} &= P^{K/C} I - {}^{bulk}\mu^{K/C} \nabla \cdot \vec{u} I + 2\mu^{K/C} \left[D + \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{u} I \right] \\ \Leftrightarrow \\ \vec{\tau}^{K/C} &= P^{K/C} I + 3 {}^{bulk}\mu^{K/C} \overset{\circ}{D} + 2\mu^{K/C} \overline{\overline{D}}\end{aligned}\quad (2.22)$$

E o tensor taxa de deformação dado por,

$$D = -\frac{1}{2} \left[\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right] \quad (2.23)$$

Sendo,

I = tensor tensão unitário, [-];

$\nabla \cdot \vec{u}$ = divergente do vetor velocidade, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

$P^{K/C}$ = pressão cinética-colisional, $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$;

D = tensor taxa de deformação da fase sólida, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

$\overset{\circ}{D}$ = parte esférica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações associadas com a mudança de volume), $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

$\overline{\overline{D}}$ = parte deviatorica do tensor taxa de deformação (o qual representa todas as deformações cisalhantes), $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

${}^{bulk}\mu^{K/C}$ = viscosidades *bulk* cinética-colisional, $[M^1 L^{-1} T^{-1}]$;

$\mu^{K/C}$ = viscosidades cisalhante cinética-colisional, $[M^1 L^{-1} T^{-1}]$.

Deve-se ter em mente que isto é somente válido quando as colisões são de curta duração e o caminho médio livre entre as partículas é grande o suficiente para permitir a oscilação dos grãos.

Para que se possam descrever as equações constitutivas para o cálculo das propriedades da fase sólida no regime cinético-colisional a fim de se determinar a distribuição de tensões deve-se, primeiramente, definir uma das propriedades base da teoria cinética do escoamento granular juntamente com seu princípio de conservação.

a) Temperatura Granular

Analogamente à temperatura termodinâmica para gases, a temperatura granular pode ser introduzida como sendo uma medida da flutuação da velocidade das partículas. As Equações 2.24 e 2.25 a seguir representam, respectivamente, a temperatura granular e a

energia de flutuação por unidade de massa, ambas geradas pelo movimento randômico dos grãos.

$$\theta = \frac{1}{3} \langle C^2 \rangle \quad (2.24)$$

e,

$$E_\theta = \frac{1}{2} \langle C^2 \rangle = \frac{3}{2} \theta \quad (2.25)$$

Sendo,

E_θ = energia de flutuação por unidade de massa, $[M^0 L^2 T^{-2}]$;

C = flutuação da velocidade dos grãos, $[M^0 L^1 T^{-1}]$;

θ = temperatura granular, $[M^0 L^2 T^{-2}]$;

$\langle \rangle$ = média da flutuação de velocidade.

Deve-se ter em mente que a temperatura granular não é uma medida da magnitude das colisões. Ela simplesmente mede a velocidade do movimento aleatório. Consequentemente, ela possuirá um valor igual a zero (sendo, desta forma, inválida a teoria cinética granular) quando o sistema granular estiver “congelado”, isto é, em altas concentrações, não havendo, consequentemente, possibilidade de oscilações por parte dos grãos (DARTEVELLE, 2003).

Teoricamente, isto somente ocorrerá quando muito próximo do limite máximo de empacotamento o sistema estiver (aproximadamente 64% em frações volumétricas), embora, em concentrações de aproximadamente 50% e maiores, a temperatura granular decresça em virtude de os grãos possuírem cada vez menos espaço para oscilarem. Em altas concentrações outra aproximação é necessária, isto é, o modelo friccional.

Como considerado para o caso da fase gasosa, as partículas, em um escoamento granular, oscilam sobre um valor médio de uma maneira caótica.

Logo, com base na mecânica estatística, foi assumido para a distribuição da flutuação de velocidades em um escoamento granular, como seguindo uma distribuição Gaussiana ou normal, chamada de distribuição Maxwelliana (GIDASPOW, 1994).

A razão do número 3 no denominador da equação que define a temperatura granular é a realização de uma média nas três dimensões espaciais.

b) Conservação da Temperatura Granular

O fluxo de energia na teoria cinética granular, diferentemente do fluxo de energia mecânica convencional, é apresentado pela Figura 2.12 a seguir.

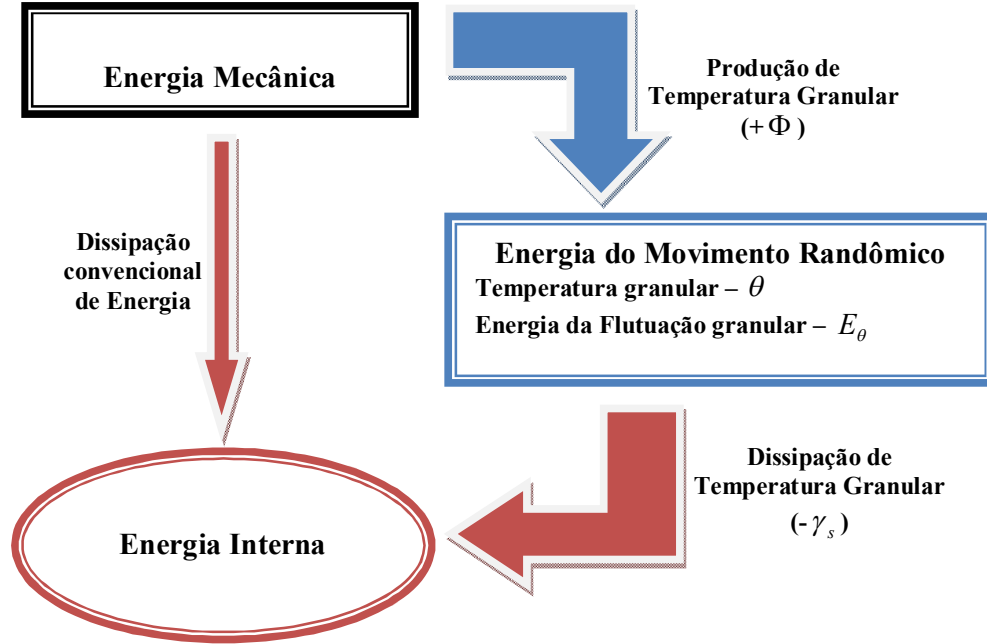


Figura 2.12 – Fluxo de energia em um escoamento granular multifásico (DARTEVELLE, 2003).

A produção de energia do movimento randômico dos grãos é feita principalmente através da dissipação viscosa granular (Φ). Devido à natureza inelástica existente na colisão entre os grãos, parte desta energia de flutuação se dissipará (γ_s) em “calor térmico” (ou convencionalmente energia interna). Desta forma, E_θ representa um estado transiente de energia no processo de dissipação em um escoamento granular. Em geral, a temperatura granular é máxima em situações bastante diluídas.

A obtenção dos valores de temperatura granular (θ) é realizada levando-se em conta o fato de que, sendo E_θ uma forma de energia, deve existir, naturalmente, uma equação fundamental para a sua conservação (Equação 2.26).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\hat{\rho}_s E_\theta) + \nabla \cdot (u \hat{\rho}_s E_\theta) = \Phi - \nabla \cdot q - \gamma_s + K[C_g C] - 3\theta \quad (2.26)$$

O parâmetro $\hat{\rho}_s$ é chamado de densidade *bulk* de sólidos, sendo função da fração volumétrica de sólidos (ε_s) e da densidade dos sólidos (ρ_s) (Equação 2.27).

$$\hat{\rho}_s = \rho_s \varepsilon_s \quad (2.27)$$

Retornando à equação anterior tem-se que, o primeiro termo do lado esquerdo representa a taxa de aumento da energia de flutuação dentro do volume de controle considerado (termo transiente), enquanto que o segundo termo, ainda do lado esquerdo da equação, representa a taxa líquida de energia de flutuação transferida por convecção para dentro deste mesmo volume de controle.

Tomando-se agora como análise o lado direito da equação acima, tem-se que:

- O termo $\Phi = \left[(-\tau^{K/C}) : \nabla \vec{u} \right] - P^{k/c} \nabla \cdot \vec{u}$, se refere à geração de energia de flutuação dentro do volume de controle sendo, $\left[(-\tau^{k/c}) : \nabla \vec{u} \right]$ devido ao trabalho realizado pelas forças de superfície ou tensões, isto é, a dissipação viscosa, enquanto a parcela $P^{k/c} \nabla \cdot \vec{u}$ refere-se ao trabalho realizado pela pressão granular cinético-colisional;
- O segundo termo do lado direito representa o termo de condução da temperatura granular. Sendo “q” o fluxo de temperatura granular e é definido por uma lei do tipo Fourier, ou seja, $q = -k \nabla \theta$, sendo “k” a condutividade da temperatura granular, o qual é fortemente dependente da concentração dos grãos, do tamanho dos grãos e da inelasticidade da colisão. De um modo geral, quanto maior for o tamanho dos grãos ou quanto maior for a concentração dos grãos, melhor será a condução da temperatura granular;
- O terceiro termo, γ_s , representa a perda de temperatura granular devido à natureza inelástica da colisão dos grãos. O termo, γ_s , é sempre positivo, consequentemente, ele representa a perda líquida de temperatura granular. Este termo causa a transformação de temperatura granular em temperatura “convencional” ou termodinâmica. De um modo geral, quanto maior for a concentração de grãos, maior será o termo dissipativo γ_s . Por outro lado, quanto maior o diâmetro dos grãos, menor será o valor de γ_s . Consequentemente, pequenas partículas tendem a ter uma pequena temperatura granular ou, equivalentemente, tendem a ter grandes perdas de temperatura granular.
- O quarto e último termo do lado direito da equação representa a taxa líquida de transferência de energia de flutuação entre as fases gás e sólida. O primeiro termo dentro dos

colchetes representa um ganho de energia de flutuação granular vindo da energia de flutuação turbulenta das moléculas do gás, enquanto o segundo termo representa uma perda de energia de flutuação granular devido ao atrito aerodinâmico gás-sólido. Sendo, $3\theta = \langle C^2 \rangle$; C a flutuação de velocidade aleatória dos grãos; C_g a flutuação de velocidade aleatória das moléculas do gás e K uma função de arraste gás-sólido (sempre um termo positivo).

Infelizmente é muito difícil calcular o termo $\langle C_g C \rangle$, pelo fato da necessidade de um modelo completo de turbulência gás-partícula, o qual ainda não existe. Mas é muito provável que tal termo possa ser negligenciável para partículas grandes e pesadas, não afetadas pelo movimento aleatório das moléculas do gás (DARTEVELLE, 2003).

Tendo-se, agora, descrito alguns dos fundamentos da teoria cinética do escoamento granular podemos, finalmente, apresentar as equações para o cálculo da pressão e da viscosidade cinético-colisional, para se obter o tensor tensão cinético-colisional.

❖ Pressão Cinética-Colisional

A interpretação para a pressão cinética-colisional é a mesma que para a pressão termodinâmica dos gases na qual a pressão do gás atuando sobre uma superfície é visualizada como o resultado do impacto de moléculas sobre esta superfície.

Na teoria cinética do escoamento granular, as moléculas são simplesmente substituídas por grãos, sendo que, quanto maior for a energia de flutuação dos grãos, maior será a pressão granular. O problema é que a concentração granular pode se tornar consideravelmente alta (maior do que a das moléculas do gás) e conseqüentemente teremos que lidar com inúmeras colisões as quais são inelásticas. Desta forma, a pressão cinética-colisional é modificada levando-se em conta os efeitos inelásticos das colisões (2.28):

$$P^{k/c} = \varepsilon_s \rho_s \theta + 2\varepsilon_s^2 \rho_s \theta (1 + e) g_0 \quad (2.28)$$

Sendo,

g_0 = função de distribuição radial, [-];

e = coeficiente de restituição, [-].

O primeiro termo do lado direito da equação representa a parte cinética da pressão (assim como para as moléculas de gás), enquanto o segundo termo representa a contribuição colisional.

O coeficiente de restituição representa a inelasticidade entre o choque de partículas sendo que, para colisões perfeitamente elásticas ele teria o valor igual a um e a dissipação de temperatura granular seria igual a zero. Para um material granular típico, o valor do coeficiente de restituição é tomado como sendo entre 0,9 e 0,99 (DARTEVELLE, 2003).

A variável g_0 é denominada de função de distribuição radial a qual descreve a probabilidade de encontrarmos duas partículas próximas o suficiente para colidirem. Sua principal função é a de prevenir uma sobre compactação de material granular na medida em que ela age como uma função repulsiva entre os grãos quando eles estão muito próximos um dos outros. A Equação 2.29 a seguir, representa o modelo proposto por LUN *et al.* (1984).

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{S,máx}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (2.29)$$

O comportamento da função de distribuição radial em face à mudança no valor de fração volumétrica de sólidos é ilustrado na Figura 2.13, sendo $\varepsilon_{S,máx}$, aqui considerado, com o valor de 0,63.

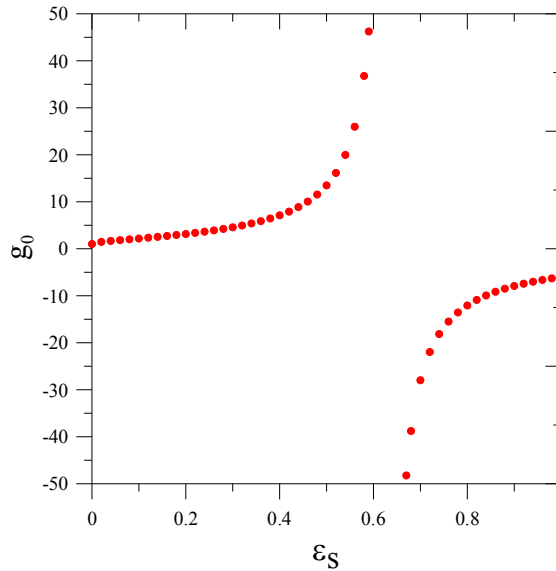


Figura 2.13 – Função de distribuição radial em função da fração volumétrica de sólidos.

Observa-se, a partir da Figura 2.13 que, a função de distribuição radial possui o valor igual a 1 para baixas concentrações mas tende a infinito para um sistema próximo ao limite máximo de empacotamento quando a temperatura granular tende a zero e, neste caso, ocorre somente a influência do regime friccional sendo a contribuição cinética colisional desprezível.

Nota-se, também, uma descontinuidade quando a concentração volumétrica é igual ao limite máximo de empacotamento (63% em volume) denotando o fato de que esta função não é mais válida para concentrações maiores ou iguais a este limite.

❖ Viscosidade Cisalhante e Viscosidade *Bulk* Cinética-Colisional

Basicamente, do ponto de vista microscópico, a viscosidade é devido ao movimento randômico de moléculas ou grãos em um escoamento granular. Este movimento randômico carrega alguma quantidade de movimento e, conseqüentemente, é responsável pela homogeneização do *momentum* por todo o escoamento.

A Equação 2.30 descreve a viscosidade cisalhante cinética-colisional que atua em um escoamento granular diluído.

$$\mu^{k/c} = \frac{4}{5} \varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{\varepsilon_s \rho_s d_p \sqrt{\theta \pi}}{6(3-e)} \left[1 + \frac{2}{5} (1+e)(3e-1) \varepsilon_s g_0 \right] \quad (2.30)$$

Sendo,

d_p = diâmetro das partículas, $[M^0 L^1 T^0]$.

O primeiro termo do lado direito da equação acima representa a contribuição cinética para a viscosidade (LUN *et al.*, 1984) enquanto o segundo termo do lado direito representa a contribuição colisional (SYAMLAL *et al.*, 1993).

A viscosidade cisalhante, algumas vezes chamada de viscosidade dinâmica, mede o movimento caótico de moléculas ou grãos, sendo que, como dito anteriormente, para fluidos é comum se assumir uma viscosidade *bulk* igual a zero. Contudo, para gases formados por moléculas poliatômicas, a viscosidade *bulk* não pode ser considerada igual a zero porque, a vibração e rotação de tais moléculas podem de alguma forma afetar o seu movimento translacional ao longo do caminho médio livre. Para estes tipos de gases, a viscosidade *bulk* mede estas influências rotacionais e vibracionais das moléculas (DARTEVELLE, 2003).

No caso do escoamento granular, a viscosidade *bulk* não pode ser considerada igual a zero e, diferentemente do caso de gases, esta propriedade não mede influências rotacionais e vibracionais dos grãos, mas é simplesmente proporcional à viscosidade cisalhante e, como tal, está relacionada somente ao movimento randômico dos grãos (Equação 2.31) (LUN *et al.*, 1984).

$$^{bulk}\mu^{k/c} = \frac{4}{5} \varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (2.31)$$

2.2.7 – Combinação das Propriedades Cinético-Colisionais e Friccionais

Finalmente, baseando-se no trabalho realizado por SAVAGE (1983), as propriedades da fase granular nos diferentes tipos de regime podem ser combinadas em uma única propriedade, a depender da fração volumétrica de sólidos.

$$P_{S,total} = \begin{cases} P^{K/C} + P^f, & \text{para } \varepsilon_s > \varepsilon_{s,min} \\ P^{K/C}, & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,min} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\mu_{S,total} = \begin{cases} ^{bulk}\mu^{K/C} + \mu^{K/C} + ^{bulk}\mu^f + \mu^f, & \text{para } \varepsilon_s > \varepsilon_{s,min} \\ ^{bulk}\mu^{K/C} + \mu^{K/C}, & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,min} \end{cases} \quad (2.33)$$

Logo, retornando à Equação 2.12 do tensor tensão total, o qual representa a soma das contribuições cinética, colisional e friccional, teremos.

$$\vec{\tau}_s = \vec{\tau}^{k/c} + \vec{\tau}^f = PI + \vec{\tau} \quad (2.34)$$

Sendo,

$$P = P^{k/c} + P^f \quad (2.35)$$

e,

$$\vec{\tau} = - \left[^{bulk}\mu^{k/c} + ^{bulk}\mu^f \right] \nabla \cdot uI + 2 \left[\mu^{k/c} + \mu^f \right] \overline{\overline{D}} \quad (2.36)$$

Consequentemente, P e $\vec{\tau}$ representam todas as contribuições dos efeitos cinético, colisional e friccional sobre a distribuição de tensão total na fase granular.

2.2.8 – Método dos Volumes Finitos

Os métodos de discretização são utilizados para providenciar um conjunto de equações algébricas, juntamente com um algoritmo de resolução, a partir de um modelo constituído por uma equação diferencial. As equações algébricas envolvendo uma determinada variável desconhecida (por exemplo, temperatura, velocidade, etc..) são

denominadas de equações discretizadas e são derivadas de uma equação diferencial envolvendo esta mesma variável desconhecida (PATANKAR, 1980).

Os métodos de discretização mais utilizados são:

- ❖ Diferenças finitas;
- ❖ Volumes finitos;
- ❖ Elementos finitos;
- ❖ Método híbrido, volumes finitos/elementos finitos;
- ❖ Métodos espectrais.

Em geral, os métodos numéricos podem ser obtidos do método de resíduos ponderados, como é o caso de diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos, etc. A minimização dos resíduos, no método de volumes finitos, é equivalente aos princípios de conservação sobre cada volume de controle. Quando não ocorre sobreposição do volume de controle com seus vizinhos, é possível criar um conjunto de equações discretas que satisfaçam o balanço global de conservação. A garantia de que os princípios de conservação serão satisfeitos, a nível elementar e global, é que torna o Método dos Volumes Finitos atrativo e fisicamente consistente.

O *software* Fluent[®], utilizado neste trabalho, emprega preponderantemente o Método dos Volumes Finitos na resolução numérica de sistemas de equações parciais diferenciais. Tal fato pode ser justificado pelas peculiaridades de Método dos Volumes Finitos em fornecer resultados providos de realismo físico, caso a convergência seja atingida, até mesmo nas situações onde são empregadas malhas numéricas “grosseiras” (pouco refinadas).

Uma descrição mais detalhada do método de Volumes Finitos é apresentada por PATANKAR (1980).

2.2.9 – Tipos de Malhas Computacionais

Existem diferentes tipos de malhas computacionais a depender das formas geométricas dos volumes ou células e dos padrões de distribuição destes volumes ao longo da geometria de interesse. Elas podem ser classificadas em:

❖ Malhas Uniformes

Este tipo de malha possui este nome devido ao fato de a malha ser disposta em um padrão regular repetido, chamado de bloco. Estes tipos de grades utilizam elementos quadriláteros em 2D e elementos hexahédricos em 3D.

Malhas uniformes apresentam uma considerável vantagem sobre outros tipos por permitir ao usuário um alto grau de controle. Além disso, elementos quadriláteros e hexahédricos permitem ao usuário condensar pontos nas regiões de altos gradientes de fluxo da grandeza de interesse e também gerar regiões menos densas quando necessário.

A Figura 2.14 apresenta um exemplo de malha uniforme, constituída de elementos hexahédricos.

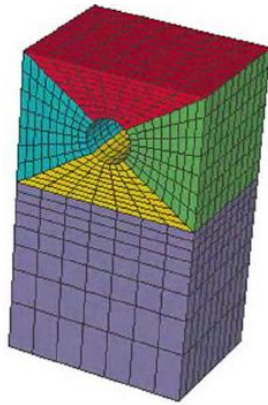


Figura 2.14 – Malha uniforme contendo células hexahédricas (DUARTE, 2006).

❖ *Malhas Não-Uniformes*

Malhas não-uniformes são compostas por uma coleção arbitrária de elementos no intuito de preencher o domínio de cálculo. Como o arranjo de elementos não tem nenhum padrão discernível, a malha é chamada de não-uniforme. Estes tipos de grades geralmente utilizam triângulos em 2D e tetraedros em 3D.

A vantagem neste tipo de malha é que elas requerem menor esforço do usuário e tempo para construção. Elas também habilitam a solução de problemas muito complexos e detalhados em um período relativamente curto de tempo. A principal desvantagem, neste tipo de malha, é a falta de controle do usuário sobre a disposição dos volumes ou células.

A Figura 2.15 apresenta um exemplo de malha não-uniforme, constituída de elementos tetraédricos.

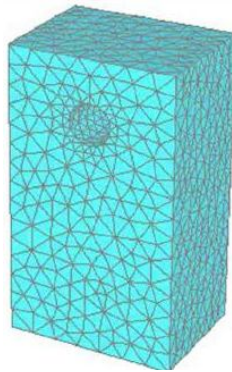


Figura 2.15 – Malha não-uniforme contendo células tetraédricas (DUARTE, 2006).

❖ Malhas Híbridas

A vantagem de métodos de malha híbrida é a utilização das propriedades positivas de elementos de grade uniforme nas regiões de mais detalhamento e de malhas não-uniformes onde o perfil a ser analisado for de menor interesse. A habilidade para controlar a forma e distribuição da malha localmente é uma ferramenta poderosa que pode render malhas excelentes e garantir resultados satisfatórios. A Figura 2.16 representa um exemplo de malha híbrida.

Sendo como desvantagem das malhas híbridas, a exigência de muita prática e experiência quando aplicadas em corpos com geometrias complexas (DUARTE, 2006).

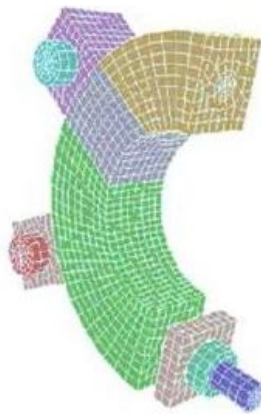


Figura 2.16 – Malha híbrida (DUARTE, 2006).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Materiais e Metodologia Experimental

Este tópico tem o intuito de apresentar a unidade experimental, os materiais e as metodologias empregadas na abordagem experimental do presente trabalho.

3.1.1 – Descrição da Unidade Experimental e do Material Particulado

Todos os experimentos foram realizados em uma unidade experimental localizada no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU), cujo esquema é mostrado na Figura 3.1.

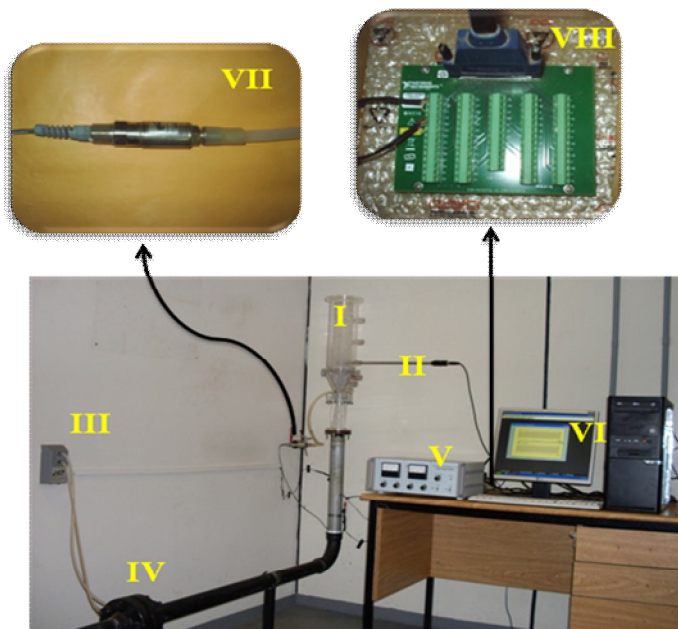


Figura 3.1 – Ilustração geral da unidade experimental do leito de jorro.

A unidade experimental ilustrada na Figura 3.1 é equipada com: um leito de jorro (I); sonda de fibras ópticas (II); um medidor de vazão do tipo placa de orifício (IV) a qual foi previamente calibrada com o auxílio de um anemômetro de fio quente; um sensor transmissor de pressão do tipo capacitivo (III), instalado na placa de orifício com o objetivo de transmitir, através de sinais analógicos, a queda de pressão do fluido ao transpor a placa; um sensor transmissão de pressão (VII) instalado na entrada do leito de jorro, a fim de transmitir sinais analógicos de pressão manométrica; um painel registrador de sinais analógicos provenientes da

sonda de fibras ópticas (V) o qual tem por objetivo, também, a conversão destes sinais analógicos em digitais; uma placa de aquisição de dados (VIII) com a finalidade de converter sinais analógicos em sinais digitais e armazenar os dados para posterior tratamento e um PC (VI). Como fonte propulsora de ar utilizou-se de um soprador de 7,5 cv.

O leito de jorro utilizado neste trabalho foi confeccionado em acrílico transparente para uma melhor visualização dos fenômenos em seu interior. O equipamento possui orifícios na parede lateral para a introdução da sonda e cujos espaçamentos em relação à entrada do leito são ilustrados na Figura 3.2 a seguir.

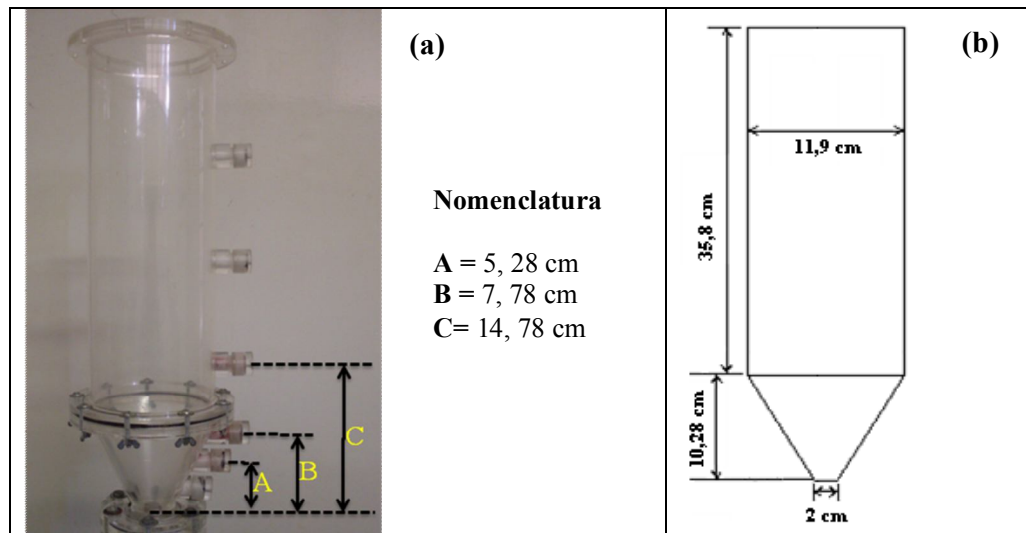


Figura 3.2 – Leito de jorro: (a) ilustração do espaçamento dos orifícios de entrada da sonda utilizados; (b) dimensões do leito de jorro.

O sistema multifásico utilizado foi do tipo fluido-sólido, sendo a fase fluida o ar ambiente e a fase sólida partículas de vidro, cujas características são dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades do material particulado.

Material	Massa específica (kg/m ³)	Esfericidade	Diâmetros médios de peneira (mm)
vidro	2458,4	1,0	1,29 e 2,18

A massa específica das esferas de vidro foram determinadas através da análise picnométrica a gás hélio.

Para todos os experimentos realizados foi utilizada uma altura de leito estático de 12 cm em relação à entrada do leito de jorro.

Os diâmetros de esferas de vidro de 1,29 mm e 2,18 mm foram previamente escolhidos com base nas características das sondas disponíveis no Laboratório de Sistemas Particulados (FEQUI/UFU), descritas a seguir.

3.1.2 – Descrição do Sistema de Medida

Foram utilizados sondas de fibras ópticas, juntamente com o *software* PV6 (*Partical Velocity Analyser*) versão 1.1.7, fabricadas pelo *Institute of Process Engineering Chinese Academy of Sciences*.

O instrumento em questão é aplicado na caracterização fluidodinâmica de escoamentos multifásicos, o qual é principalmente utilizado na medida de velocidade de partículas em sistemas gás – sólido e líquido – sólido, podendo ser estendido para medidas de concentrações relativas de sólidos.

Suas principais características são:

- ❖ realiza medida de velocidade média, valores instantâneos e distribuições estatísticas de velocidade de partículas em sistemas com duas fases;
- ❖ realiza medida de concentração relativa (concentrações de sólidos ou porosidade) de materiais particulados em movimento;
- ❖ indica a direção real do movimento das partículas próximas aos pontos de medida.

As sondas utilizadas no presente trabalho são compostas, cada uma, por dois canais os quais são feixes de fibras ópticas arranjados em um certo intervalo de comprimento a depender do diâmetro das partículas a serem caracterizadas e que tem ambas as funções de emitir e receber a luz refletida pelas partículas (Figura 3.3).

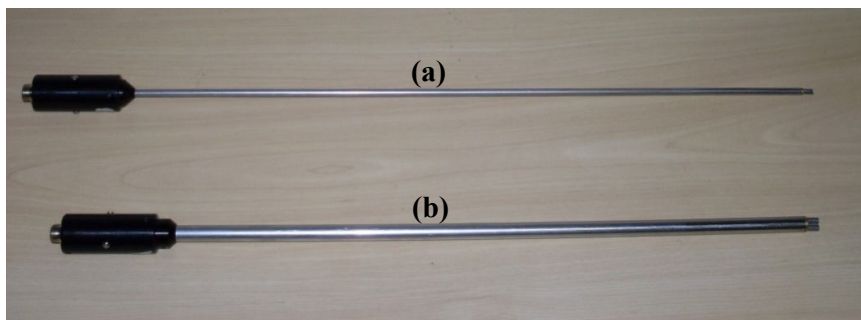


Figura 3.3 – Configuração das sondas de fibras ópticas utilizadas.

As dimensões importantes na caracterização de uma sonda de fibra óptica são ilustradas na Figura 3.4.

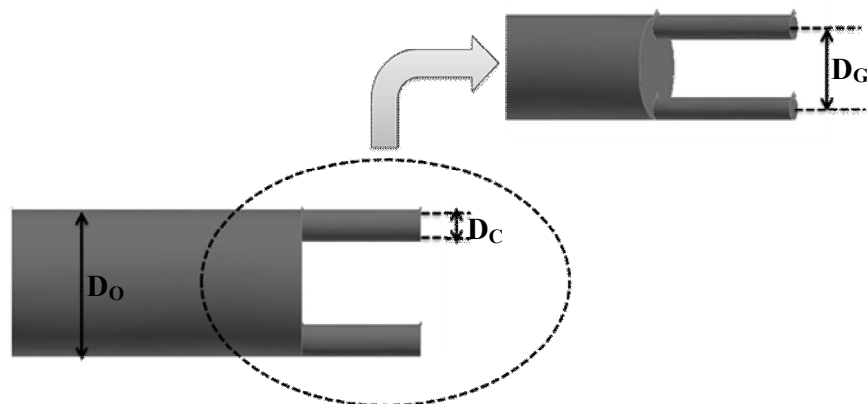


Figura 3. 4 – Dimensões características da sonda de fibra óptica sendo: D_c o diâmetro de cada canal, D_g a distância geométrica entre os canais e D_0 o diâmetro da sonda.

O diâmetro externo ou do corpo da sonda (D_0) está diretamente relacionado ao grau de perturbação causada ao escoamento devido à sua introdução. Quanto maior o seu valor, maior será esta perturbação. A precisão na medida de porosidade depende, dentre outros fatores, da razão entre os valores do diâmetro das partículas em estudo e do diâmetro dos canais da sonda (D_c). Quanto menor for esta razão, maior será a precisão na medida pelo fato de permitir que o feixe de luz, proveniente dos canais da sonda, percorra entre os interstícios do meio poroso. Já o diâmetro D_g está relacionado à medida de velocidade de partículas.

As especificações técnicas das sondas utilizadas (Figura 3.3) são dispostas na Tabela 3.2 a seguir:

Figura 3.2 – Especificações técnica das sondas de fibras ópticas.

Configurações	Número de Canais	D_0 (mm)	D_c (mm)	D_g (mm)
(a)	2,0	5,0	1,1	2,5
(b)	2,0	10,0	2,8	4,8

A luz refletida pelas partículas é recebida por duas fibras laterais, sendo, então, enviadas a um detector fotoelétrico a partir do qual é convertida em sinais de voltagem (sinais analógicos) para dois canais analógicos (CH1 e CH2).

Um conversor A/D (Analógico/Digital), presente no interior do painel registrador de sinais analógicos provenientes da sonda de fibras ópticas (Figura 3.1), conectado a um computador via USB, teve por objetivo converter sinais de voltagem (analógicos) em sinais

digitais (binários), a fim de proporcionar uma otimização em termos de aquisição e processamento de dados, possuindo as seguintes características técnicas:

- ❖ conversão sincronizada e independente de sinais vindos dos dois canais sem “tempo morto”;
- ❖ frequência de amostragem que varia de 60hz à 2Mhz;
- ❖ 12 bits de resolução;

3.1.3 – Posicionamento da Sonda no Interior do Escoamento

No caso em que a direção do movimento do material a ser medido não é a priori conhecida, deve-se, ao introduzir a sonda no escoamento, realizar medidas do coeficiente de correlação ao mesmo tempo em que a sonda é girada no seu interior.

Logo, a direção do movimento real do material pode ser determinada com base na dimensão dos coeficientes de correlação e da magnitude dos valores de velocidade.

A posição dos canais dentro do leito foi ajustada tal que se encontrem perpendiculares à direção do escoamento, como mostrado na Figura 3.5.

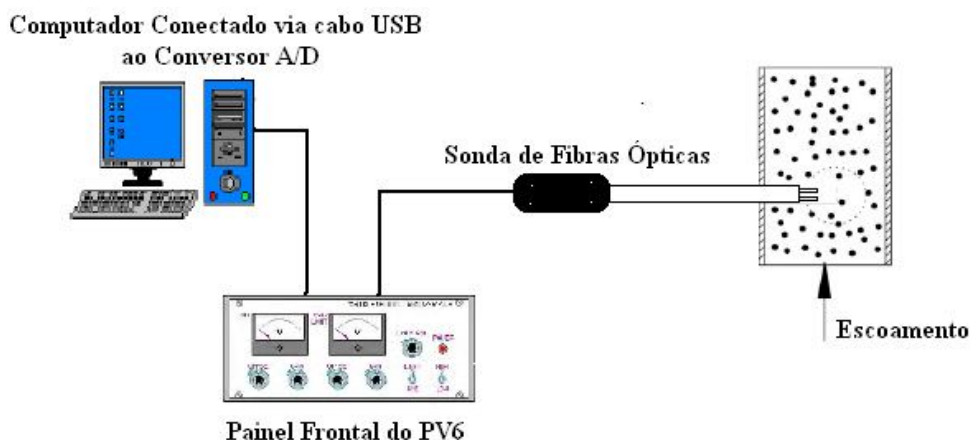


Figura 3.5 – Ilustração da posição dos canais da sonda de fibras ópticas no interior do escoamento.

Cuidados devem ser tomados quando da verificação da direção real do movimento do material com o objetivo de medir velocidade de partículas, do contrário pode-se levar a resultados inconsistentes do ponto de vista físico.

No que diz respeito ao leito de jorro, as partículas possuem movimento ascendente na região central ou região de jorro e movimento descendente na região anular, ou seja, ocorre uma inversão de movimentos. Para tratar tal fenômeno, a sonda deve ser girada 180°

exatamente na interface entre a região de jorro e a anular com o intuito de trocar a posição dos canais.

No entanto, uma outra forma de se realizar esta inversão entre os canais da sonda é, ao invés de girar a sonda manualmente, realizar a modificação diretamente na equação de correlação cruzada, sendo este o procedimento utilizado no presente trabalho.

Tal transição foi detectada por meio da leitura dos valores de velocidade, sendo que, quando se aproximava da região de inversão do movimento este valor de velocidade atingia o valor zero.

3.1.4 – Determinação da Distância Efetiva entre os Canais que compõe a Sonda

Há uma pequena discrepância entre a distância geométrica, D_G , medida centro a centro dos canais, e a distância efetiva, D_e , entre os canais que compõe a sonda. O sinal contendo a maior quantidade de luz refletida pela partícula que pode ser efetivamente captada pelo canal ocorre em uma posição tal que não corresponde necessariamente ao centro do canal. Logo, a distância efetiva entre os canais é menor do que a distância geométrica dos mesmos (ZHU *et al.*, 2001).

Consequentemente é necessário uma calibração para determinar a distância efetiva entre os canais.

A distância efetiva (D_e) entre os canais deve ser, no que diz respeito à precisão da medida, a menor possível, porém deve ser maior do que o diâmetro das partículas a serem medidas no caso de um único tamanho de partícula, ou maior do que o diâmetro médio das partículas, no caso de mistura de partículas.

O sistema de calibração, com uma estrutura semelhante ao utilizado por ZHU *et al.* (2001), foi confeccionado de tal forma a conter, de acordo com a Figura 3.6: um disco giratório (I); um motor (II) conectado a um inversor de frequências (III), a fim de variar sua rotação; um tacômetro digital (V) e um suporte para manter a sonda em uma posição pré-fixada (IV).

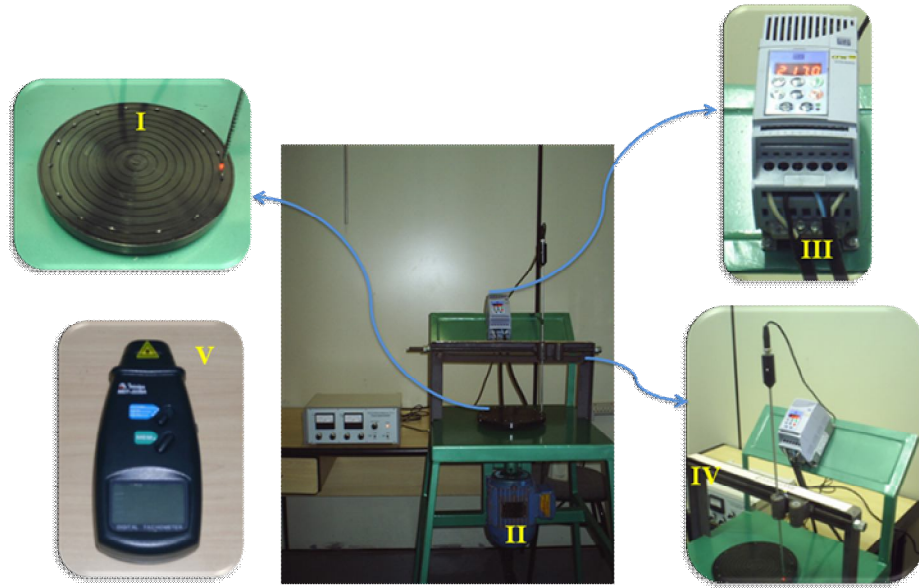


Figura 3.6 – Sistema de Calibração.

Para realizar a calibração, esferas de vidro foram fixadas ao longo de uma circunferência com diâmetro previamente conhecido sobre o disco giratório, o qual teve sua face pintada de cor preta para evitar a reflexão excessiva de luz, como pode ser visto no item (I) da Figura 3.6.

O disco giratório foi colocado a girar em várias velocidades, o que foi possível devido a alterações da rotação do eixo do motor via um inversor de frequências. Para cada velocidade do disco foi captado, por meio de um tacômetro digital, as respectivas velocidades angulares e, sabendo-se o raio da circunferência onde estavam fixadas as partículas, pôde-se extrair suas velocidades lineares de acordo com a Equação 3.1.

$$v_l = \frac{2\pi r_C v_{ang}}{60} \quad (3.1)$$

Utilizando-se agora da sonda, introduziu-se no *software* PV6, como “chute inicial”, a distância geométrica entre os canais medida por um paquímetro. Após as medidas de velocidades de partículas em cada uma das condições com as quais o tacômetro foi utilizado, a distância entre os canais foi sendo diminuída até atingir os respectivos valores reais de velocidade de partículas dadas pelo tacômetro.

O procedimento acima foi realizado para cada uma das sondas descritas na Figura 3.3.

3.1.5 – Determinação do Número de Blocos ou Subdivisões dos Dados

Em virtude do escoamento no leito de jorro utilizado neste trabalho ter apresentado uma característica suavemente pulsante, foi adotado o “Tratamento 2” (Figura 2.7) de processamento da função de correlação cruzada para a medida de velocidades locais o qual produz, ao invés de um único valor de velocidade, uma distribuição de velocidade de partículas ao longo do tempo.

A melhor maneira de confirmar o tamanho dos blocos, ou subdivisões temporais dos dados adequados, é realizar uma série de medidas para verificar se ocorre uma tendência dos dados em função do tamanho de blocos (BARRI *et al.*, 2004).

Para tanto, após fixar esferas de vidro de diâmetro de 2,18 mm sobre um determinado raio do disco giratório do calibrador mostrado na Figura 3.6, ajustou-se uma determinada rotação do motor através do inversor de frequências e, após este, mediu-se a velocidade linear correspondente através do tacômetro (Equação 3.1).

Com a velocidade de partículas conhecida, escolheu-se, através do programa PV6, um número total de pontos de amostragem no valor de 131072 pontos os quais foram divididos em 512, 256, 128, 64 e 32 blocos de dados, conforme mostra a tabela abaixo.

Tabela 3.3 – Divisão do número total de dados em determinados números de blocos.

Número de Blocos de Dados	Quantidade de Dados em cada Bloco
512	256
256	512
128	1024
64	2048
32	4096

Para cada configuração de número de blocos foi medida a velocidade das partículas, fazendo-se uso da sonda de fibras ópticas de configuração (a), na mesma condição de rotação do motor anteriormente utilizada pelo tacômetro.

Este mesmo procedimento foi realizado para outros valores de rotação do motor no intuito de avaliar a variação da velocidade de partículas medidas pela sonda em função do número de blocos escolhido. O número de blocos considerado ideal é aquele onde não se detecta mais tendências nos dados.

3.1.6 – Calibração da Sonda para Medida de Porosidade

O maior problema encontrado em sondas de fibras ópticas com o objetivo de medir porosidade é em relação ao procedimento de calibração. A precisão da medida é fortemente

dependente da precisão da técnica de calibração utilizada.

Com base em trabalhos renomados anteriores (QIN e LIU, 1982; MATSUNO *et al.*, 1983; BOIARSKI, 1985) onde uma relação linear foi encontrada entre o valor de porosidade medido e o sinal de saída da sonda de fibra óptica e devido ao fato de esta relação ter sido utilizada com sucesso em leito de jorro cilíndrico por HE *et al.* (1994), em leito de jorro cônico (OLAZAR *et al.*, 1998 e SAN JOSÉ *et al.*, 2005) e em *jet spouted bed* (Barrozo *et al.*, 2010), o presente trabalho optou por utilizar esta técnica de calibração, a qual se baseia na existência de uma relação linear entre a porosidade e o sinal de voltagem captado pela sonda de fibras ópticas.

A Equação 3.2 abaixo, a qual representa uma relação linear, foi utilizada para converter os sinais de voltagem em valores de fração volumétrica de sólidos enquanto que a Equação 3.3 converte fração volumétrica de sólidos em porosidade.

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_U (Vo - Vo_L)}{(Vo_U - Vo_L)} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s \quad (3.3)$$

Para se determinar o valor de ε_U realizou-se um ensaio de proveta onde, primeiramente, pesou-se uma determinada proveta através de uma balança digital. Após a determinação do peso da proveta, a mesma foi preenchida com uma determinada quantidade de água até certa altura. A diferença entre os pesos da proveta contendo água e da proveta vazia determinou o peso da água. Medindo-se a temperatura da água foi possível determinar, via literatura, o valor de sua densidade e, conseqüentemente, de seu volume.

Valendo-se das esferas de vidro, a mesma altura da proveta antes preenchida com água, foi preenchida com certa quantidade de sólidos. Após esta etapa, pesou-se a quantidade de sólidos necessária para alcançar a altura pré-fixada.

Munido da densidade e da massa de sólidos foi possível o cálculo do volume de partículas e, desta forma, de ε_U (Equação 3.4).

$$\varepsilon_U = \frac{V_s}{V_s + V_A} \quad (3.4)$$

Consequentemente, o valor de ε_U determinado e que foi utilizado neste trabalho, é de $\varepsilon_U = 0,63$.

O procedimento para a determinação dos valores de V_{OL} e V_{OU} é descrito a seguir:

- ❖ Primeiramente introduziu-se a sonda no interior do leito vazio e realizou-se a medida de voltagem;
- ❖ Para esta condição fixou-se um *offset* igual a 0 V;
- ❖ Após este, o leito foi preenchido com esferas de vidro auxiliado por um funil para tentar homogeneizar o empacotamento do leito e, com a sonda contida em seu interior, realizou-se novamente a medida de voltagem;
- ❖ Para esta condição fixou-se um ganho igual a 4,5 V (próximo do fundo de escala do equipamento o qual possui o valor de 5,0 V);
- ❖ As etapas anteriores foram repetidas até que o sinal de voltagem permanecesse próximo de 0 volts para o leito vazio e próximo de 4,5 V para o leito empacotado.

Vale ressaltar que uma calibração diferente foi realizada para cada condição de experimento.

3.1.7 – Validação do Método Utilizando Sonda de Fibras Ópticas na Medida de Velocidade de Partículas

A fim de validar as medidas de velocidades realizadas com a sonda de fibras ópticas, medidas de velocidade de partículas foram obtidas nas mesmas condições através de uma técnica não-intrusiva, a qual utiliza uma câmera de alta velocidade (de até 2000 frames/s), semelhante à utilizada por DUARTE *et al.* (2005).

Em virtude de o leito de jorro aqui utilizado ser tridimensional, a utilização da câmera de alta velocidade restringiu-se à medida de velocidades somente na parede do leito ao contrário do que foi feito por DUARTE *et al.* (2005) que utilizaram um leito bidimensional possibilitando a medida de perfis de velocidade de partículas.

Primeiramente desenhou-se uma malha quadriculada com espaçamentos uniformes de 1 cm^2 sobre uma região de interesse na parede do leito, como mostrada na Figura 3.7.

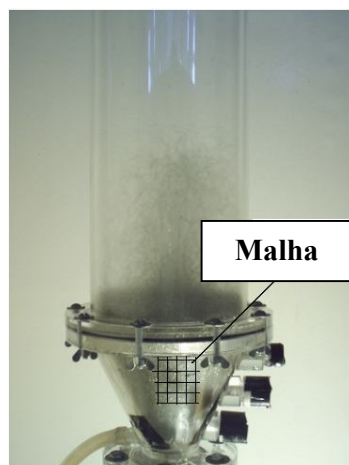


Figura 3.7 - Destaque da malha quadriculada desenhada na parede do leito.

Munido da câmera de alta velocidade, as imagens foram gravadas, todas utilizando-se de 250 frames/s, e observando-se o número de frames que uma determinada partícula despendia ao transpor um determinado espaço foi possível o cálculo de sua velocidade através da Equação 3.5.

$$v_P = \frac{250L}{N_F} \quad (3.5)$$

A tomada de medida de velocidades de partículas foi fixada, para ambas as técnicas, a uma altura de 7,78 cm em relação à entrada do leito (posição B ilustrada na Figura 3.2) e estritamente na parede do mesmo, em virtude da limitação da utilização da técnica não-intrusiva declarada anteriormente.

Foram utilizadas esferas de vidro de diâmetro de 2,18 mm e velocidades de ar à entrada do leito de 27, 30 e 36 m/s. Para cada velocidade de ar foram coletados, através da câmera de alta velocidade, 5 dados de velocidade de partículas as quais foram utilizadas no cálculo das médias.

A sonda utilizada neste experimento foi a de configuração (a), menor sonda, com as seguintes especificações:

- ❖ Frequência de amostragem de 10 khz ;
- ❖ Intensidade da luz de 3,0 V;
- ❖ Distância efetiva fixada após calibração;
- ❖ Número de blocos fixado após calibração;
- ❖ Tamanho da amostra de 131072;

❖ Tempo de amostragem de 13 s;

No caso das medidas realizadas com a sonda, nas mesmas condições de quando da utilização da técnica não-intrusiva, obteve-se uma distribuição de velocidade de partículas, sendo o número de dados em cada distribuição igual ao número de blocos considerado. Após a eliminação de alguns valores que se mostravam, do ponto de vista físico, incoerentes com a realidade e do ponto de vista estatístico, discrepantes com relação às tendências dos dados, realizaram-se médias para a obtenção de velocidade de partículas.

3.1.8 – Análise da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas

Para avaliar a influência da introdução da sonda de fibras ópticas no interior do escoamento em um leito de jorro, foram observados a variação da altura da fonte e o seu deslocamento em relação ao eixo central do leito.

Primeiramente, o leito de jorro foi preenchido até uma altura de leito fixo de 12 cm em relação à entrada com esferas de vidro de diâmetro de 2,18 mm. Fixou-se uma fita de papel milimetrado em sua parede frontal, a fim de se quantificar a altura da fonte. A sonda utilizada nesta avaliação foi a sonda de configuração (a) e a altura em relação à entrada do leito de 7,78 cm (entrada B na Figura 3.2).

As velocidades de ar à entrada do leito utilizadas foram de 27, 30, 33 e 36 m/s, sendo que, para cada condição de velocidade de ar, a sonda era deslocada radialmente de 0,5 cm em 0,5 cm desde o centro do leito até a sua parede.

Foram tiradas fotos do leito destacando a região de fonte em cada uma destas condições e quantificadas as respectivas alturas da fonte.

3.1.9 – Medida de Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro

A fim de se medir a velocidade de partículas, esferas de vidro de diâmetro de 2,18 mm foram utilizadas com diferentes condições de velocidade de ar a entrada do leito: 27, 30, 33 e 36 m/s. Para cada condição de velocidade de ar foram medidos perfis radiais de velocidade de partículas em três diferentes alturas em relação à entrada do leito, sendo estas de 5,28, 7,78 e 14,78 cm denotadas como A, B e C, respectivamente (Figura 3.2).

O leito de jorro foi preenchido com partículas até uma altura de leito fixo de 12 cm em relação a sua entrada.

As seguintes especificações foram utilizadas quando da medida de velocidades de partículas por meio da sonda de configuração (a):

- ❖ Frequência de amostragem de 10 khz a 20khz;
- ❖ Intensidade da luz de 3,0 V;
- ❖ Distância efetiva fixada após calibração;
- ❖ Número de blocos fixado após calibração;
- ❖ Tamanho da amostra de 131072;

A frequência de conversão ou frequência de amostragem (f) foi ajustada de acordo com a faixa de velocidades de partículas a serem medidas. Para a região de jorro foi utilizada, devido à presença de maiores valores de velocidade de partículas, uma frequência de amostragem de 20 khz e para a região anular foi utilizada uma frequência de 10 khz.

Mesmo quando da correlação cruzada de um sinal contendo ruído com a cópia armazenada de um sinal esperado, esta técnica de correlação cruzada produz resultados surpreendentemente bons para detectar a existência do sinal conhecido, porém é aconselhável a utilização de um sistema de filtragem.

Os sinais, antes da conversão A/D, necessitam de um processo adequado de filtração para remover os sinais com uma frequência maior do que a de amostragem, desta forma, garantindo precisão em relação aos dados amostrados. O filtro utilizado no instrumento foi um filtro ativo de passo baixo (*Active Low Pass Filter*).

Para cada posição da sonda no interior do leito, coletou-se uma quantidade de dados de velocidade de partículas igual ao número de blocos escolhidos, sendo realizadas, após o devido tratamento, médias.

Visto que as partículas em um leito de jorro possuem movimento ascendente na região central ou região de jorro e movimento descendente na região anular, ou seja, ocorre uma inversão de movimentos, tomou-se o cuidado de verificar a magnitude dos valores de velocidade na medida em que a sonda iria percorrendo as posições radiais.

Quando a velocidade atingia um valor próximo ou igual a zero, em uma posição intermediária à região de jorro e à parede, os canais da sonda eram invertidos através da modificação da função de correlação cruzada.

Não foi possível realizar a medida do perfil radial de velocidade de partículas para a condição de velocidade de ar de 27 m/s e altura em relação à entrada do leito de 14,78 cm (região de fonte) porque o diâmetro da fonte, nestas condições, não cobria uma faixa viável para a utilização da sonda.

Já para a velocidade de ar de 30 m/s, na mesma altura da condição anterior, coletou-se pontos até onde a sonda se encontrava em contato com a fonte, logo, menos pontos foram coletados para esta velocidade quando comparado com as outras condições.

Para a medida de porosidade, utilizou-se das mesmas condições empregadas no cálculo de perfis radiais de velocidade de partículas exceto que, além das partículas de 2,18 mm de diâmetro, foram utilizadas, também, as partículas de 1,29 mm.

Ao contrário dos experimentos anteriores, a sonda utilizada para a medida de porosidade foi a sonda de configuração (b), visto que, agora, a precisão da medida independe da distância efetiva entre os canais, mas sim da razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do canal.

As condições de velocidade de ar à entrada do leito quando da utilização das esferas de 1,29 mm foram de 22, 24, 26 e 28 m/s.

O procedimento para a calibração da sonda foi o mesmo descrito no tópico 3.1.4, sendo o valor de $\varepsilon_U = 0,63$ e a determinação dos valores de Vo_L e Vo_U realizada para cada condição.

Para cada posição radial da sonda coletou-se 3 valores de voltagem (V) que, após a devida calibração e determinação dos valores de porosidade através das Equações 3.2 e 3.3, foram utilizados no cálculo da média.

3.2 – Metodologia Numérica

Este tópico tem o intuito de apresentar a configuração do conjunto de computadores (*cluster*) utilizado na realização das simulações juntamente com a metodologia numérica aplicada.

3.2.1 – Configuração do *Cluster* utilizado nas Simulações

Para a realização das simulações numéricas, utilizou-se de um *cluster*, o qual corresponde a um conjunto de processadores interligados em paralelo, cujas especificações técnicas são descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Configuração do *Cluster*.

Sistema Operacional	Número de Máquinas	Memória RAM/Máquina	Tipo de Processador	Total de Núcleos	Interface de Comunicação
Linux Open Suse 11.2	16	4 Gb	i7	40	SSH e open mpi

Foram necessárias a utilização, em média, de 5 das 16 máquinas que compõem o *cluster*, tornando viável, em relação ao tempo de processamento, as simulações.

3.2.2 – Confeção da Malha Computacional e Teste de Independência de Malhas

Para a confeção da malha computacional foi utilizado o *software* GAMBIT® versão 2.3.16, sendo esta uma etapa de suma importância, pois interfere diretamente nos resultados simulados podendo estes não condizer com a realidade do fenómeno.

As etapas de pré-processamento são descritas de forma concisa por DUARTE (2006), a qual segue abaixo:

- ❖ Construção da geometria do equipamento;
- ❖ Definição das faces e/ou volumes;
- ❖ Determinação de efeitos como camada limite ou outro tipo de refinamento desejado;
- ❖ Aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetrahédrica, hexahédrica ou híbrida);
- ❖ Definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
- ❖ Determinação das fases que compõem o interior do equipamento, por exemplo, fluido (ar) e/ou sólido (sementes de soja, esferas de vidro etc.);
- ❖ Conversão do arquivo (com extensão .msh do GAMBIT®) contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo software FLUENT® (extensão .cas);
- ❖ Definição das condições de contorno e iniciais, dos modelos (Euler-Euler Granular, modelos de troca de *momentum* entre as fases, tensão de sólidos, pressão de sólidos, etc...) e os tipos de algoritmos de solução numérica a serem adotados.

Visto que a quantidade de células ou volumes contidos em uma determinada malha podem modificar os resultados numéricos obtidos e, também, influenciar no custo de processamento podendo tornar a mesma inviável computacionalmente, foram construídas 3 diferentes configurações de malhas, mostradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Refino de malhas utilizado no teste de independência.

Configurações	Quantidade de células	Dimensões	Tipo de malha
Configuração 1	26928	Tridimensional	Hexahédrica
Configuração 2	57684	Tridimensional	Hexahédrica
Configuração 3	105084	Tridimensional	Hexahédrica

Após esta etapa, para cada uma das malhas citadas anteriormente, foram realizadas simulações numéricas, utilizando-se do resolvidor numérico FLUENT® versão 12.1, de uma curva característica de um leito de jorro, a qual descreve a variação da queda de pressão na entrada do leito em função da velocidade de ar.

Para cada condição de velocidade de ar foram simulados 15 s sendo eliminados os primeiros 5 s e realizado uma média para os 10 s restantes. Logo, no total foram simulados 600 s para cada configuração de malha. As condições de contorno juntamente com os modelos utilizados no teste de independência de malhas e nas demais simulações realizadas neste trabalho são descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Condições de contorno e modelos adotados nas simulações.

Condições de Contorno	Entrada do leito: velocidade do ar (perfil parabólico)
	Saída do leito: pressão atmosférica
	Parede: velocidade igual a zero (<i>no slip</i>)
Métodos de Solução	Esquema de acoplamento pressão velocidade: SIMPLE
	Método de discretização no espaço: Up-wind de 1ª ordem
	Formulação transiente: implícita de 1ª ordem
Critério de Convergência	Equações da Continuidade e do Movimento (velocidades da fase dispersa e contínua nas direções de interesse): 1.10^{-3}
Modelo de Mistura	Euleriano Granular Multifásico
Viscosidade Granular	SYAMLAL e O'BRIEN (1993)
Viscosidade Granular Bulk	LUN <i>et al.</i> (1984)
Pressão de Sólidos	LUN <i>et al.</i> (1984)
Função de Distribuição Radial	LUN <i>et al.</i> (1984)
Modelo de Arraste	**
Limite Máximo de Empacotamento	0,63
Passo no tempo (<i>Time Step</i>)	1.10^{-4} s
Coefficiente de Restituição	0,9

** Foram realizadas simulações utilizando-se de mais de um modelo de arraste como será mostrado no próximo tópico.

A escolha do modelo de mistura, Euleriano Granular Multifásico, na modelagem do leito de jorro, foi baseada em critérios tais como, a presença, neste equipamento, de regiões contendo uma fase particulada densa e o alto carregamento de partículas. Alguns dos critérios

utilizados na escolha do modelo de mistura apropriado são descritos, de forma concisa, por DUARTE (2006).

Com base em resultados obtidos por DUARTE *et al.* (2005), o presente trabalho assumiu a condição de contorno relativa à velocidade de ar à entrada do leito, como seguindo um perfil parabólico.

3.2.3 – Modelos de Arraste Utilizados

Visto que a força de arraste é uma força de aceleração de fundamental importância no “acoplamento” das fases gás-sólido, a escolha do modelo de arraste possui grande influência nos resultados simulados (DU *et al.*, 2006).

Para tanto, foram investigados 2 modelos de arraste, sendo que um deles contém 3 diferentes versões, como descritos abaixo:

❖ GIDASPOW *et al.* (1992)

Este modelo, como descrito pelas Equações de 3.6 a 3.9 a seguir, é a combinação de outros dois modelos, a saber, modelo de ERGUN (Equação 3.6) e de WEN e YU (Equação 3.7) sendo a utilização de um ou outro dependente da faixa de fração volumétrica de sólidos.

O cálculo de C_D (coeficiente de arraste) é dependente do Re (número de Reynolds) sendo que, para valores altos de Re o valor de C_D permanece praticamente constante.

Para $\varepsilon_g \leq 0,8$

$$\beta_{Ergun} = 150 \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1,75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_g - \vec{v}_p|}{d_p} \quad (3.6)$$

para $\varepsilon_g > 0,8$

$$\beta_{Wen-Yu} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_g - \vec{v}_p| \varepsilon_g^{-2,65}}{d_p} \quad (3.7)$$

Com as seguintes condições para Re_r ,

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{(Re_r \varepsilon_g)} \left[1,0 + 0,15 (Re_r \varepsilon_g)^{0,687} \right] & \text{para } Re_r \leq 1000 \\ 0,44 & \text{para } Re_r > 1000 \end{cases} \quad (3.8)$$

Sendo,

$$\text{Re}_r = \frac{\rho_g |\vec{v}_g - \vec{v}_p| d_p}{\mu_g} \quad (3.9)$$

❖ GIDASPOW (1994)

Esta versão é similar ao modelo anterior, porém, para evitar uma descontinuidade quando da transição entre o regime mais concentrado, onde se utiliza o modelo de ERGUN (Equação 3.6), e o regime mais diluído, onde se utiliza o modelo de WEN e YU (Equação 3.7), foi proposta uma função de transição sendo dada pela Equação 3.11.

$$\beta = (1 - \varphi_{gS}) \beta_{Ergun} + \varphi_{gS} \beta_{Wen-Yu} \quad (3.10)$$

Sendo,

$$\varphi_{gS} = \frac{\arctan[1,75(0,2 - \varepsilon_s)150]}{\pi} + 0,5 \quad (3.11)$$

❖ GIDASPOW contido no Manual do *software* Fluent[®]

O modelo de Gidaspow contido no manual do *software* Fluent[®] versão 12.1 é escrito de forma similar ao modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), exceto pelo fato de não haver uma dependência entre o coeficiente de arraste e o número de Reynolds.

❖ Modelo de arraste RUC (1994)

O modelo RUC, descrito pelas Equações de 3.12 a 3.16, proposto por DU PLESSIS (1994), possui forte dependência com a fração volumétrica de sólidos, porém, não se observa uma dependência explícita com o número de Reynolds.

$$\beta = A_{RUC} \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + B_{RUC} \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_g - \vec{v}_s|}{d_p} \quad (3.12)$$

Com as seguintes condições,

$$A_{RUC} = \begin{cases} 26,8 \left[\frac{\varepsilon_g^3}{H_e(1-H_{et})(1-H_e)^2} \right] & \text{para } \varepsilon_g \leq 0,99 \\ 785,0 & \text{para } \varepsilon_g > 0,99 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$B_{RUC} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_g}{(1-H_e)^2} & \text{para } \varepsilon_g > 0,01 \\ 2,25 & \text{para } \varepsilon_g \leq 0,01 \end{cases} \quad (3.14)$$

Sendo,

$$H_{et} = (1 - \varepsilon_g)^{\frac{1}{3}} \quad (3.15)$$

e

$$H_e = (1 - \varepsilon_g)^{\frac{2}{3}} \quad (3.16)$$

O único modelo de arraste, dentre os citados acima, que já se encontra implementado no *software* Fluent[®] versão 12.1, é o modelo de Gidaspow *et al.* (1992). Os demais modelos foram implementados através do uso de UDF (*User Defined Functions*), as quais foram escritas em linguagem C e cujos códigos encontram-se em anexo.

3.2.4 - Simulação da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas

Para a análise numérica da perturbação introduzida ao escoamento pela utilização da técnica intrusiva de fibras ópticas, com o intuito de comparação com os resultados experimentais, utilizou-se como modelo de arraste o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), juntamente com as condições de contorno e modelos descritos na Tabela 3.6.

Malhas contendo a sonda de configuração (a) em cada uma das posições, desde o centro até a parede, a uma altura de 7,78 cm da base do leito, foram confeccionadas. A variação da posição radial utilizada para a sonda foi, de acordo com o experimental, de 0,5 cm, do centro do leito até a parede.

Para cada condição de velocidade de ar à entrada do leito e para cada posição radial da sonda, foram obtidos perfis de fração volumétrica de sólidos sendo o tempo de simulação gasto, para cada uma das condições, de 15 s.

3.2.5 – Simulação dos Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro

Para a obtenção numérica dos perfis radiais de velocidade de partículas e porosidade, utilizou-se dos modelos de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992), GIDASPOW (1994) e RUC (1994), juntamente com as condições de contorno e modelos descritos na Tabela 3.6.

Foram simulados, para cada condição de velocidade de ar à entrada do leito, 15 s, sendo os perfis de velocidade e de porosidade extraídos a uma altura de 5,28, 7,78 e 14,78 cm em relação à entrada do leito, de acordo com as condições experimentais.

3.2.6 – Comparação entre os Modelos de Arraste de Gidaspow *et al.* (1992) e o modelo de Gidaspow contido no Manual do software FLUENT[®]

A fim de alertar o fato de o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) estar redigido de forma equivocada no manual do *software* Fluent[®] versão 12.1 e o efeito que a ausência da relação entre C_D e o número de Reynolds pode causar nas simulações, foram simuladas curvas características de um leito de jorro para esferas de 1,29 mm e 2,18 mm. Para cada condição de velocidade de ar foram simulados 15 s sendo eliminados os primeiros 5 s e realizado uma média para os 10 s restantes. Visto que, como dito anteriormente, o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) já se encontra embutido no software Fluent[®], foi implementado através do uso de UDF o modelo de GIDASPOW contido no manual, sendo as condições de contorno juntamente com os outros modelos, descritos na Tabela 3.6.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Resultado da Calibração da Sonda para Medida de Velocidade de Partículas

As distâncias efetivas entre os canais, determinadas após o procedimento de calibração, foram de 2,31 mm e 4,62 mm, para as sondas de configurações (a) e (b) respectivamente.

Visto que, para a medida de velocidade de partículas, a distância efetiva entre os canais deve ser a menor possível, porém maior do que o diâmetro das partículas no que corresponde à precisão do método, foi adotada como sonda de medida de velocidade a sonda de configuração (a) e, como valor do diâmetro da partícula cuja velocidade será determinada como sendo de 2,18 mm.

Os dados de velocidade de partículas medidas por meio do tacômetro foram comparados com os dados de velocidade de partículas medidas por meio da sonda de configuração (a) após calibração, dispostos na Figura 4.1 a seguir.

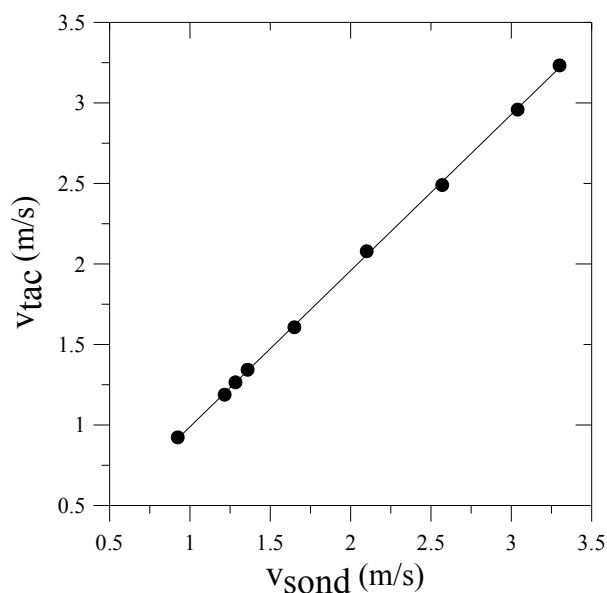


Figura 4.1 – Comparação entre as velocidades medidas por meio da sonda de fibras ópticas de configuração (a) e a velocidade real medida pelo tacômetro.

Observa-se, através da Figura 4.1, uma grande correspondência entre os valores de velocidade medidos pela sonda, após calibrada, e pelo tacômetro, sendo que foram observados pequenos desvios dentro da faixa de 3%.

Vale ressaltar que na calibração das sondas ambos os tipos de tratamento da função de correlação cruzada, “Tratamento 1” (Figura 2.5) e “Tratamento 2” (Figura 2.7), mostraram-se bastante similares visto que o movimento das partículas utilizadas no disco rotatório do calibrador era uniforme e, desta forma, não havia variações temporais nos valores de velocidade.

4.2 – Resultado da Determinação do número de Blocos para Medida de Velocidade de Partículas

A Figura 4.2 mostra a influência da divisão do número de dados no valor da velocidade de partículas calculado pela sonda de configuração (a).

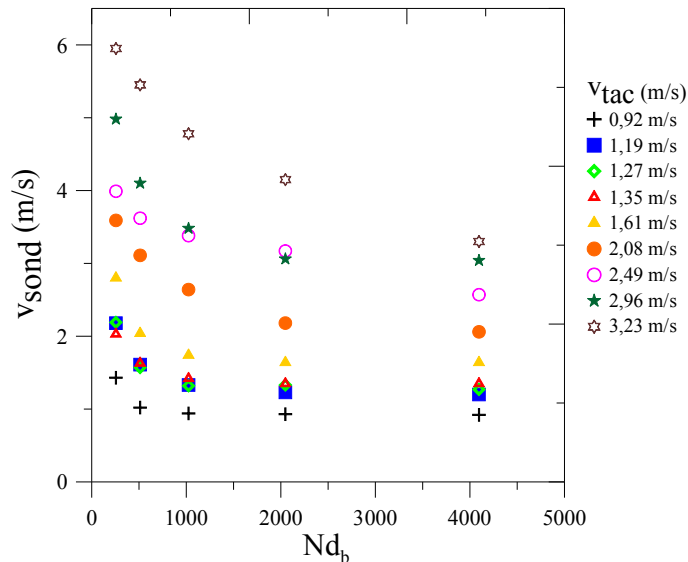


Figura 4.2 – Influência da divisão do número de dados no valor da velocidade de partículas calculado pela sonda.

Nota-se, a partir da Figura 4.2, a grande sensibilidade da função de correlação cruzada, quanto ao número de dados em cada bloco, na previsão de velocidade das partículas.

À medida que o número de dados em cada bloco diminui, a velocidade média das partículas tende a aumentar, devido ao fato de que em um número pequeno de dados em cada bloco a componente de ruído no sinal poderia “mascarar” a correlação e contribuir erroneamente no tempo de atraso da média global.

O valor do tempo de atraso medido seria provavelmente menor do que o tempo real associado com a velocidade porque o ruído contribuiria geralmente com menores tempos de atraso para a média e, conseqüentemente, ter-se-iam velocidades maiores do que são realmente. (BARRI *et al.*, 2004).

Por outro lado, à medida que o número de dados em cada bloco torna-se maior, as velocidades médias das partículas medidas através da sonda tendem a diminuir de forma assintótica em direção à velocidade real medida pelo tacômetro, como se o ruído fosse “amortecido” pela grande quantidade de dados presentes.

Com base nestas observações, escolheu-se, para o presente estudo, trabalhar com um número de dados de 131072 pontos divididos em 32 blocos contendo cada um 4096 pontos.

4.3 – Validação da Medida de Velocidade Realizada por meio da Sonda de Fibras Ópticas através de Medidas obtidas por meio de uma Câmera de Alta Velocidade

Para a sonda de configuração (a) utilizada para a medida de velocidade foram fixados, após a calibração realizada anteriormente, uma distância efetiva de 2,31 mm e um número de blocos igual a 32 blocos.

Após o devido tratamento dos dados, a Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para cada condição de velocidade de ar na entrada do leito tanto da utilização da sonda de fibras ópticas quanto da utilização da câmera de alta velocidade, juntamente com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 4.1 – Resultado das medidas de velocidade de partículas obtidas pela câmera e das medidas obtidas pela sonda na parede do leito do jorro (região anular)

$V_{ar,ent}$ (m/s)	V_{sond} (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	V_{cam} (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Desvio com relação à câmera (%)
27,0	0,0118	0,00089	0,0106	0,00017	-11,32
30,0	0,0166	0,0055	0,0168	0,00015	1,19
36,0	0,0189	0,007	0,0191	0,00132	1,05

A partir da Tabela 4.1 foi construída a Figura 4.3 a qual, para uma melhor visualização, dispõe em um mesmo gráfico os dados de velocidade de partículas medidos através das duas técnicas em função da velocidade de ar à entrada do leito de jorro.

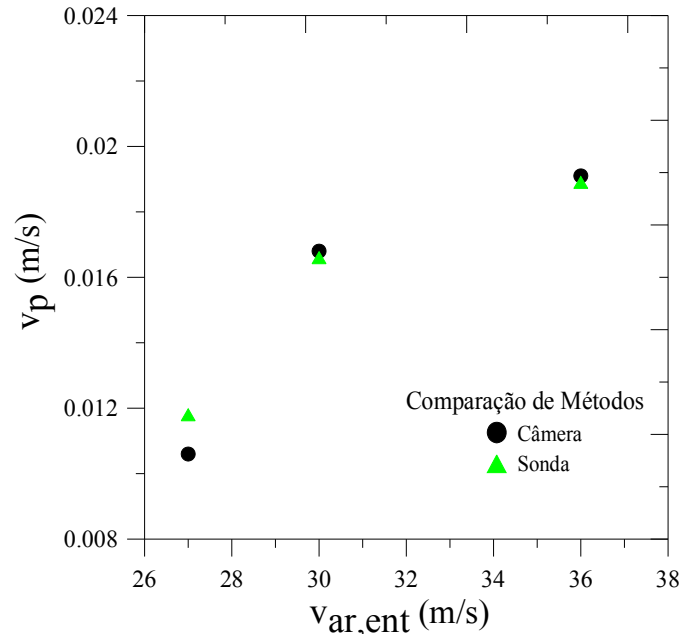


Figura 4.3 – Comparação do método de medida que utiliza uma câmera de alta velocidade com aquele que utiliza sonda de fibras ópticas.

Notam-se, após a visualização da Tabela 4.1 e da Figura 4.3, pequenas discrepâncias entre os valores de velocidade de partículas medidos pelos dois métodos.

Vale ressaltar que, para a sonda de fibras ópticas, uma distribuição de velocidades contendo um número de velocidades iguais ao número de blocos utilizados foi obtida para cada condição de velocidade de ar à entrada do leito.

A flutuação entre os valores de velocidade observados nestes dados descreve as flutuações inerentes de um sistema multifásico sendo observadas, no caso do presente estudo, leves pulsações das partículas no interior do leito. Tal característica foi também retratada quando da utilização da técnica de câmera de alta velocidade, porém, possuindo esta a vantagem de ser possível selecionar as partículas a serem acompanhadas através do visor do painel da câmera de forma a evitar a influência de pequenos distúrbios que possam ocorrer no leito.

Sendo assim, a utilização da sonda de fibras ópticas mostrou-se, após o devido tratamento dos dados, adequada para a medida de velocidade de partículas com a grande vantagem de, diferentemente da utilização da câmera de alta velocidade, poder ser introduzida no interior do leito para medidas de perfis radiais de velocidade.

4.4 – Resultados de Simulações Correspondentes ao Teste de Independência de Malhas

As curvas características de um leito de jorro simuladas com as malhas de configurações 1, 2 e 3 (Tabela 3.5) são dispostas na Figura 4.4 abaixo.

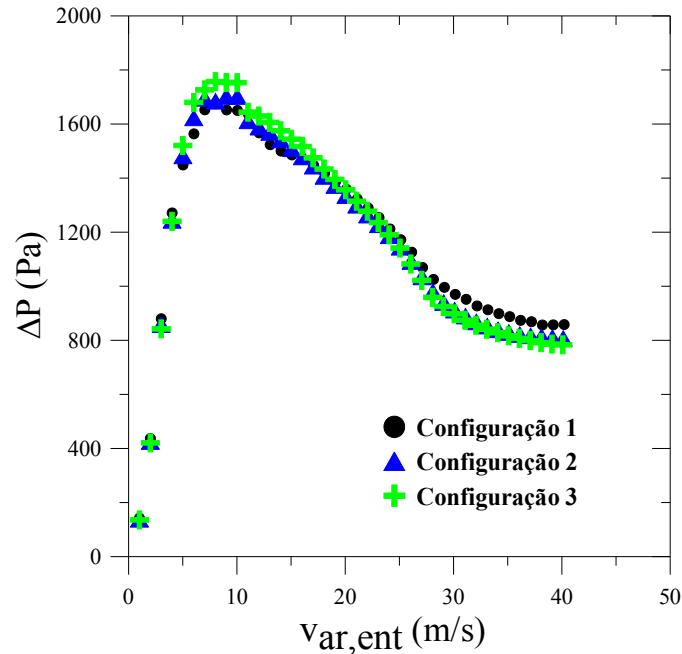


Figura 4.4 – Teste de independência de malhas.

A construção de uma curva característica para cada configuração de malha foi realizada com o intuito de abranger todas as possíveis condições com as quais seriam realizadas simulações no presente trabalho. Este procedimento não é comumente encontrado na literatura, visto que, na maioria das vezes, os testes de independência realizados levam em consideração apenas uma condição não sendo esta, necessariamente, utilizada nas simulações.

Analisando a Figura 4.4 nota-se que os resultados das simulações realizadas com as malhas de configurações 2 e 3 se mostraram próximos na região de maiores velocidades, mais precisamente na condição de leito jorrando. Por outro lado, para baixas velocidades não se observou diferenças significativas nos resultados simulados quando da utilização das malhas 1 e 2. Vale ressaltar que todas as condições simuladas foram realizadas a velocidades de ar que caracterizam a condição de jorro, logo, levando-se em consideração o tempo computacional, optou-se pela malha de configuração 2, por possuir o menor número de células para o qual não se observam mais variações significativas dos resultados.

Logo, a malha computacional que será utilizada nas simulações realizadas neste trabalho é mostrada na Figura 4.5 a seguir.

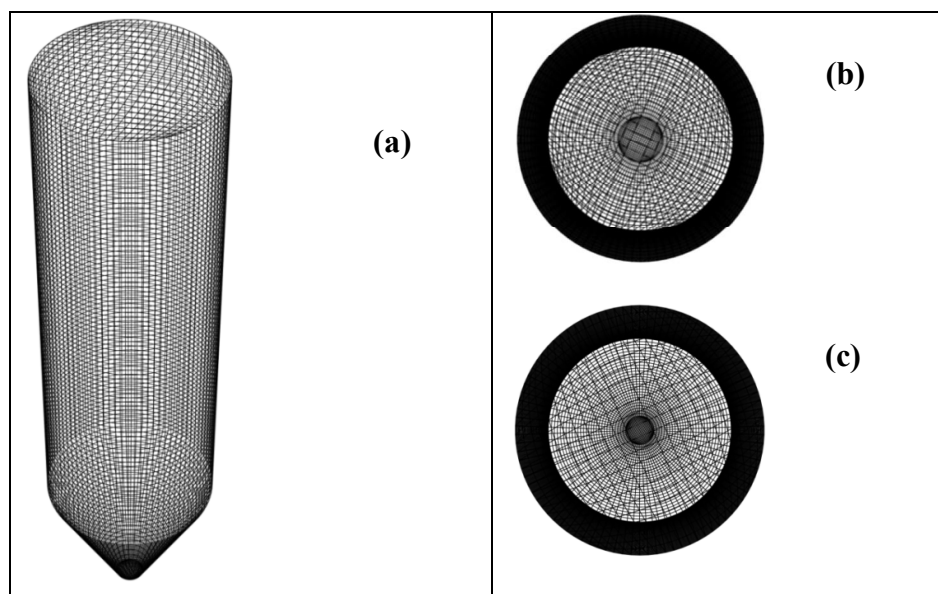


Figura 4.5 – Malha computacional tridimensional de um leito de jorro utilizada nas simulações: (a) vista isométrica; (b) vista inferior e (c) vista superior.

Foram confeccionadas, também, contendo aproximadamente o mesmo número de células que a malha da Figura 4.5, malhas contendo a sonda de configuração (a) em diferentes posições radiais para a análise numérica da perturbação ao escoamento descrita nas seções posteriores, sendo no total, 9 malhas.

Como ilustração, a Figura 4.6 mostra uma das malhas contendo a sonda de configuração (a) na posição central do leito.

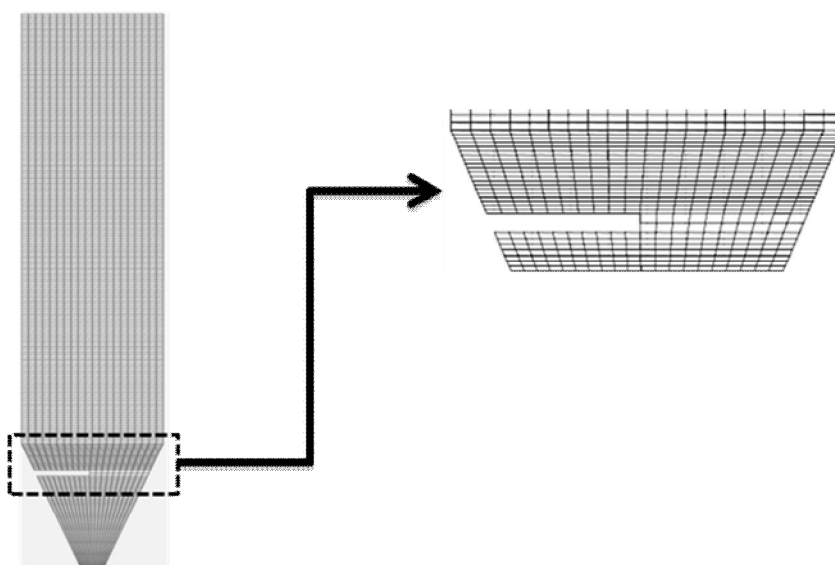


Figura 4.6 – Corte através de um plano central da malha computacional tridimensional de um leito de jorro com a sonda posicionada no centro.

4.5 – Resultados de Simulações Relativos à Comparação entre os Modelos de Arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) e o modelo de GIDASPOW contido no Manual do software Fluent[®]

As curvas características simuladas para esferas de 1,29 mm e 2,18 mm utilizando-se como modelos de arraste, o modelo de GIDASPOW *et al.*(1992) e o modelo de GIDASPOW contido no manual do software Fluent[®], são mostradas a seguir.

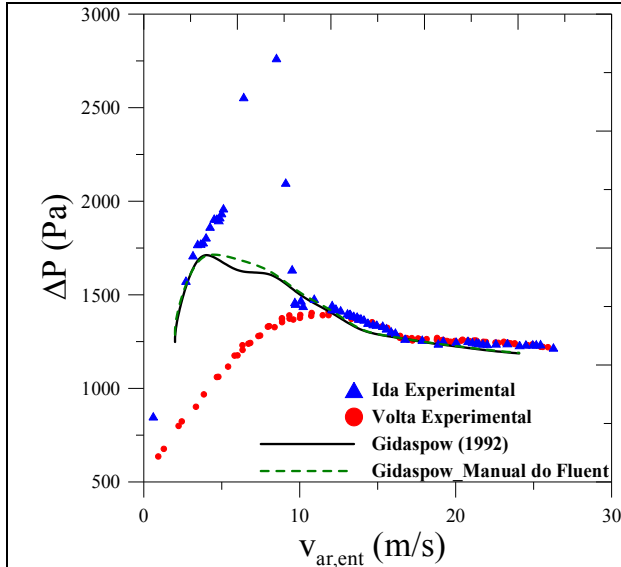


Figura 4.7 – Curva Característica para esferas de 1,29 mm de diâmetro.

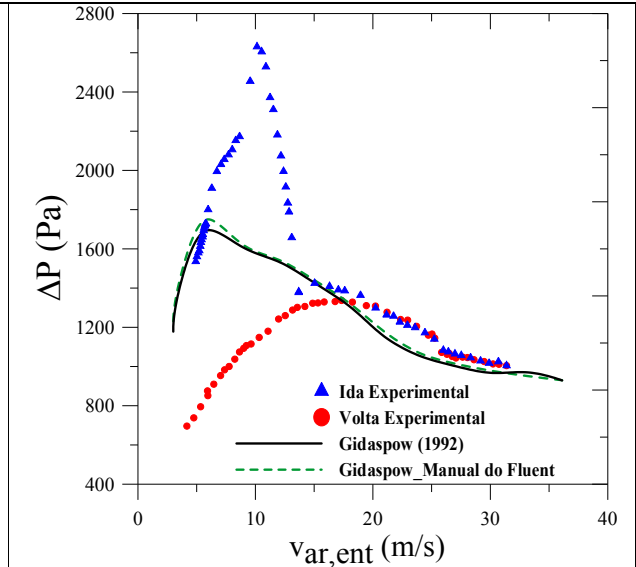


Figura 4.8 – Curva Característica para esferas de 2,18 mm de diâmetro.

Observa-se que, para ambos os modelos de arraste utilizados, houve uma satisfatória concordância entre os valores simulados e experimentais. Os valores simulados ficaram posicionados de forma intermediária com relação aos valores das curvas características experimentais de vazões de ar crescentes e de vazões de ar decrescentes na região de maior queda de pressão. Nota-se uma maior concordância entre os valores simulados com o modelo de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) e o modelo de GIDASPOW contido no manual do Fluent[®], e entre estes e o experimental, para a região de maiores velocidades de ar à entrada do leito. As pequenas diferenças entre os resultados simulados com os dois diferentes modelos em velocidades relativamente baixas podem ser devidas a ausência da dependência de C_D com o número de Reynolds no modelo redigido equivocadamente no manual do software Fluent[®].

4.6 – Resultados Experimentais e Simulados da Perturbação Introduzida ao Escoamento pela Utilização da Técnica Intrusiva de Fibras Ópticas

Para avaliar o deslocamento e a variação da altura da fonte quando da introdução da sonda, foram dispostas, lado a lado, as imagens experimentais com os respectivos perfis de fração volumétrica de sólidos simulados, para cada uma das condições de velocidade de ar à entrada do leito, assim como para cada posição da sonda no interior do escoamento, como mostrado nas figuras abaixo.

❖ Para esferas de 2,18 mm a uma velocidade do ar à entrada do leito de 27 m/s.



Figura 4.9 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 27m/s e altura da fonte detectada de 4,0 cm.

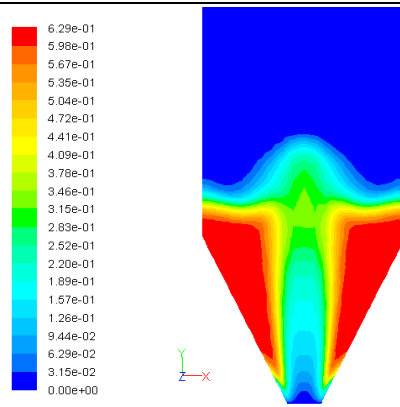


Figura 4.10 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 4,5 cm.



Figura 4.11 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 2,0 cm.

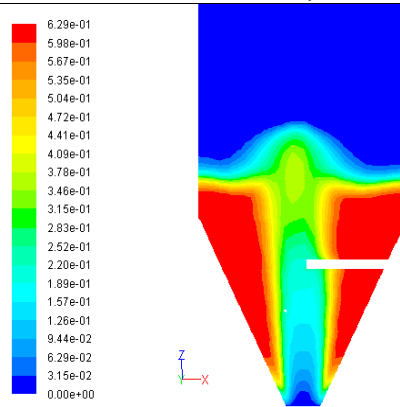


Figura 4.12 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm.



Figura 4.13 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,5 cm.

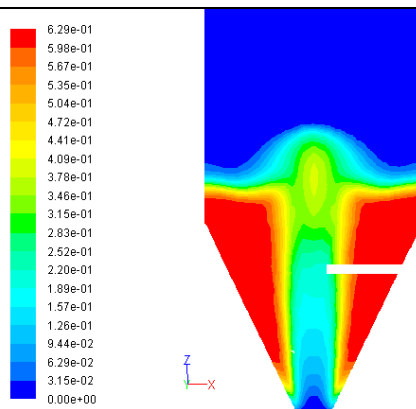


Figura 4.14 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm.

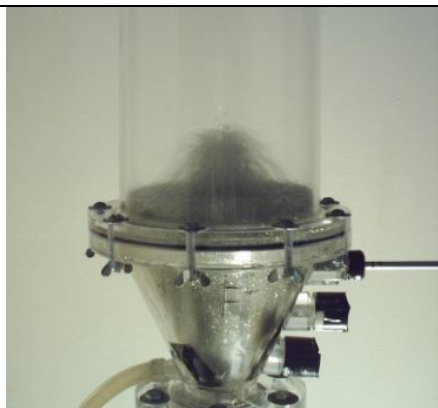


Figura 4.15 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 4,0 cm.

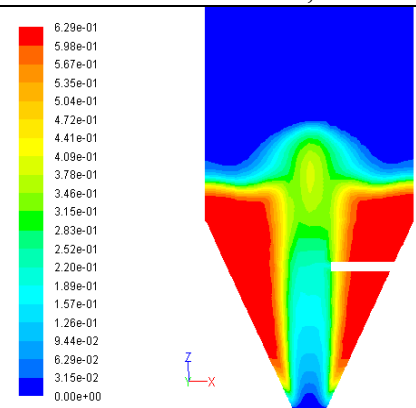


Figura 4.16 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 27 m/s e altura da fonte detectada de 3,75 cm

❖ Para esferas de 2,18 mm a uma velocidade do ar à entrada do leito de 30 m/s.



Figura 4.17 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,0 cm.

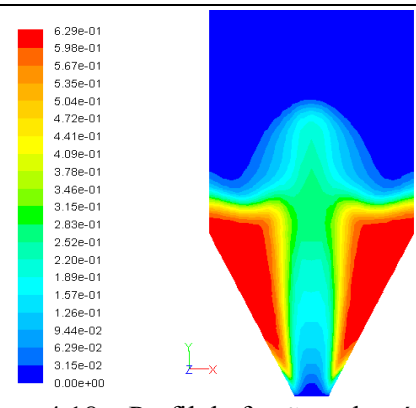


Figura 4.18 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,4 cm.



Figura 4.19 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,0 cm.

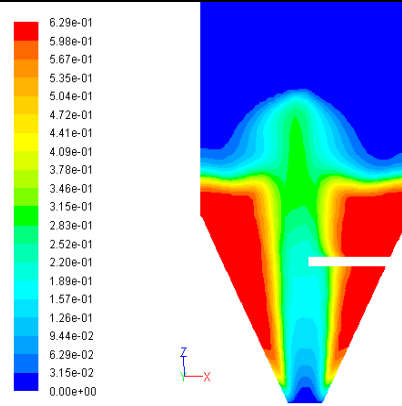


Figura 4.20 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm.



Figura 4.21 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 6,5 cm.

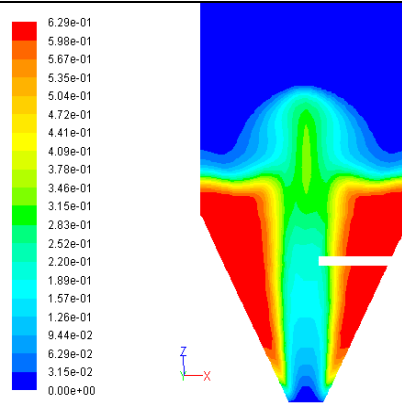


Figura 4.22 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm.



Figura 4.23 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 7,0 cm.

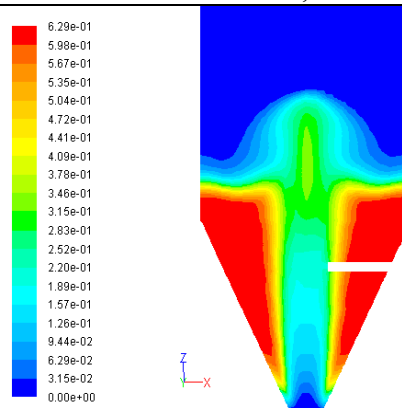


Figura 4.24 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 30 m/s e altura da fonte detectada de 5,44 cm.

❖ Para esferas de 2,18 mm a uma velocidade do ar à entrada do leito de 33 m/s.



Figura 4.25 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,5 cm.

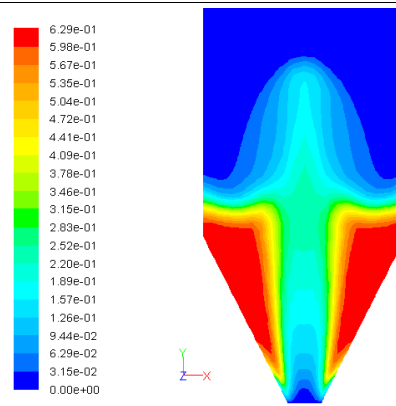


Figura 4.26 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,9 cm.



Figura 4.27 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,5 cm.

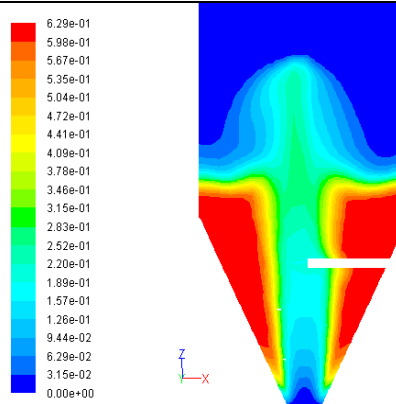


Figura 4.28 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,33 cm.

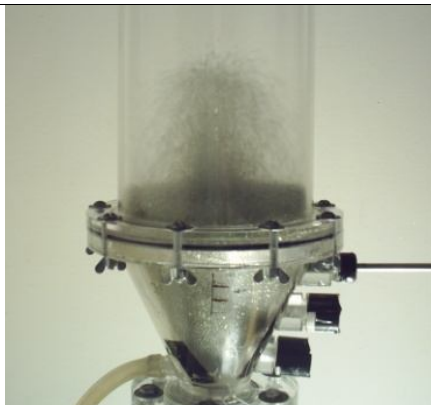


Figura 4.29 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,0 cm.

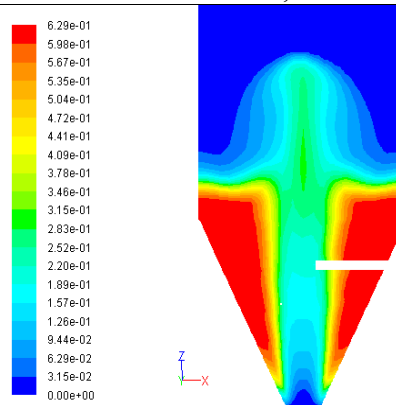


Figura 4.30 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,33 cm.

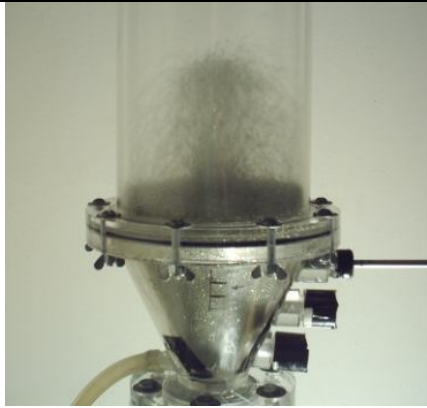


Figura 4.31 – Condição experimental com a sonda localizada à 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 9,5 cm.

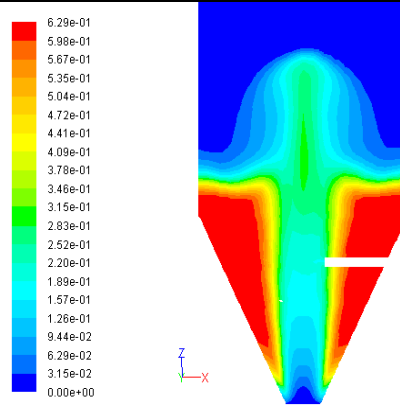


Figura 4.32 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada à 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 33 m/s e altura da fonte detectada de 7,54cm

❖ Para esferas de 2,18 mm a uma velocidade do ar à entrada do leito de 36 m/s.



Figura 4.33 – Condição experimental sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12 cm.

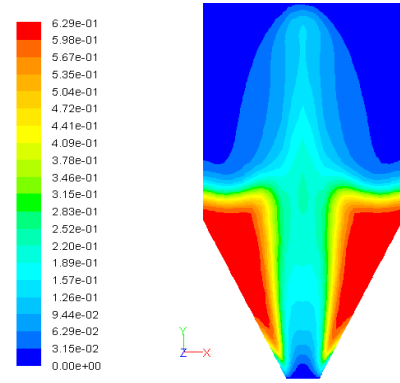


Figura 4.34 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado sem a introdução da sonda, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12,4 cm.



Figura 4.35 – Condição experimental com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 10 cm.

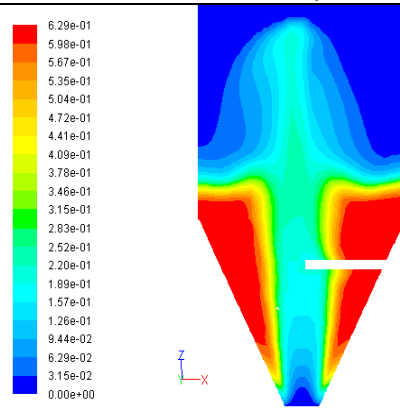


Figura 4.36 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada no centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,44cm.



Figura 4.37 – Condição experimental com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 11,5 cm.

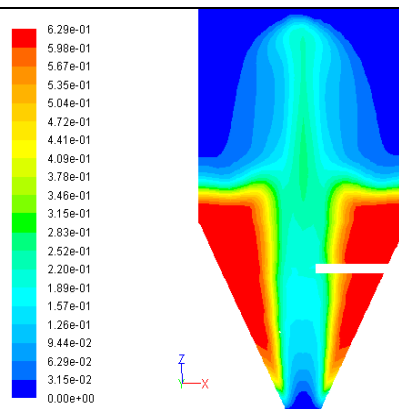


Figura 4.38 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 0,5 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,86 cm.



Figura 4.39 – Condição experimental com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 12 cm.

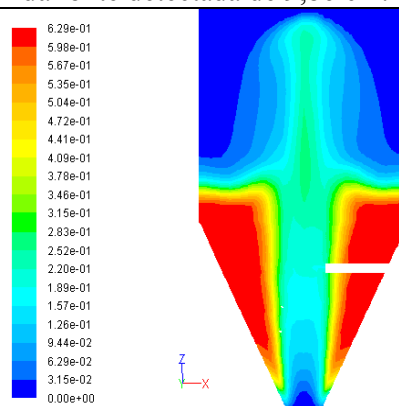


Figura 4.40 – Perfil de fração volumétrica de sólidos simulado com a sonda localizada a 1 cm do centro do leito de jorro, velocidade do ar de 36 m/s e altura da fonte detectada de 9,86 cm.

Nota-se, a partir das figuras anteriores que, em todas as condições experimentais de velocidade do ar à entrada do leito, a introdução da sonda causou uma perturbação ao escoamento. Esta perturbação foi detectada, qualitativamente, pela observação experimental do deslocamento da fonte em relação ao eixo central do leito. Verificou-se que, para todos os casos, a fonte desloca-se em sentido contrário ao da introdução da sonda sendo que, este deslocamento foi mais pronunciado, obviamente, quando a sonda se encontrava no centro do leito, em virtude do maior contato entre a sonda e as partículas. Isto pode ser explicado devido ao fato de a introdução da sonda causar uma maior perda de carga em uma pequena região desde a sua ponta até o orifício de entrada que se encontra na parede do leito. Visto que o caminho preferencial do fluido é onde ocorre a menor perda de carga, este tentará contornar o

corpo da sonda pelo lado oposto à sua introdução. Sendo assim, o fluido ao contornar o corpo da sonda, tende a modificar o escoamento das partículas arrastando-as consigo, como ilustrado na Figura 4.41 abaixo.

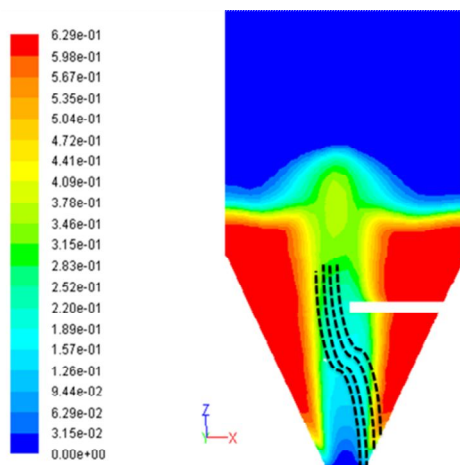


Figura 4.41 – Ilustração da modificação do escoamento causado pela introdução da sonda, simulado nas mesmas condições da Figura 4.9

Verificou-se, também, uma grande coerência fenomenológica entre o comportamento experimental e simulado, nas mesmas condições de velocidade de ar, sem e com a introdução da sonda evidenciando a capacidade de previsão do modelo utilizado.

Pode ser observado, por exemplo, nas Figuras 4.10 e 4.12, as quais representam perfis de fração volumétrica de sólidos simulados que, a introdução da sonda causou um deslocamento da fonte no mesmo sentido que no experimental.

Para a realização de uma análise quantitativa da perturbação ao escoamento causado pela introdução da sonda, a altura da fonte foi registrada para cada condição de velocidade de ar à entrada do leito e para cada posição da sonda.

Observou-se, por exemplo, para uma velocidade de ar de 27 m/s, através das Figuras 4.9, 4.11, 4.13 e 4.15 que, a altura da fonte diminuiu com a introdução da sonda e foi aumentando gradativamente na medida em que a sonda foi sendo retirada do leito de partículas até que a altura atingisse o valor de quando da ausência da sonda.

O deslocamento da sonda foi realizado de 0,5 cm em 0,5 cm até que não se observou mais variações da altura da fonte, fato que ocorreu, independentemente da velocidade de ar, a uma posição que se encontrava a 1,0 cm do centro do leito. A máxima variação da altura da fonte observada foi quando a sonda se encontrava no centro do leito, sendo seu valor de aproximadamente 2,0 cm para todas as condições.

Logo, a perturbação foi detectada com maior intensidade na região de jorro e na região de transição entre esta e a região anular.

Foram contabilizadas, também, as alturas das fontes simuladas nas mesmas condições do experimental. Como pode ser observado através dos perfis de fração volumétrica de sólidos, houve grande correspondência em termos de magnitude entre os valores das alturas de fonte experimentais e simuladas quando da não introdução da sonda.

Nota-se, semelhantemente ao experimental, uma variação da altura da fonte no sentido de diminuí-la quando se compara os perfis simulados sem e com a introdução da sonda no centro do leito embora esta variação não corresponda, exatamente, aos valores observados experimentalmente.

Logo, verificou-se experimental e numericamente que, embora o diâmetro da sonda (D_o) aqui utilizada, não seja comparável ao diâmetro da parte cilíndrica do leito, foi possível a detecção de perturbações a ponto de deslocar a fonte e diminuir sua altura, mesmo que suavemente, o que pode interferir na medida de propriedades principalmente quando a sonda se encontra no centro do leito.

Foi possível, também, para todas as condições analisadas, prever através de simulações a perturbação causada pela introdução da sonda ao escoamento.

Esta análise é de fundamental importância quando da simulação de perfis de propriedades do escoamento obtidos experimentalmente por uma técnica intrusiva, pois, na prática os trabalhos sobre simulações encontrados na literatura não levam o fenômeno da perturbação em consideração.

4.7 - Perfis Radiais de Velocidade de Partículas e Porosidade em um Leito de Jorro

Este tópico é dividido em duas partes no sentido de apresentar separadamente os resultados para quando da medida de velocidade de partículas e os resultados de medida de porosidade, a fim de se tornar clara a visualização e compreensão dos perfis.

4.7.1 – Perfis de Velocidade de Sólidos

As figuras a seguir mostram os perfis de velocidade de partículas de diâmetro de 2,18 mm a determinadas condições de velocidade de ar e alturas da entrada do leito, tanto experimentais, quanto simulados com diferentes modelos de arraste.

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 27m/s

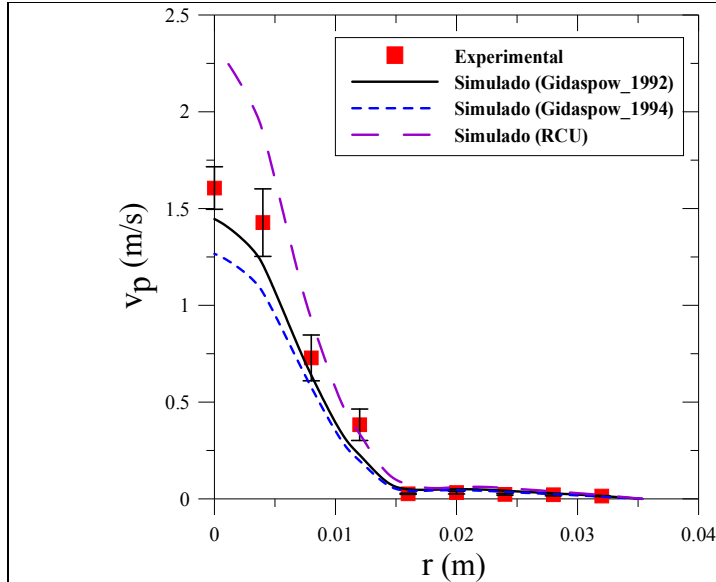


Figura 4.42 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

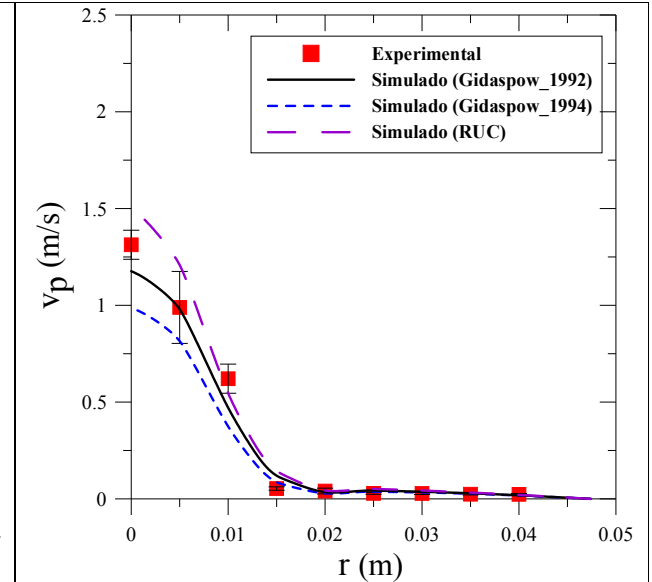


Figura 4.43 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 30 m/s

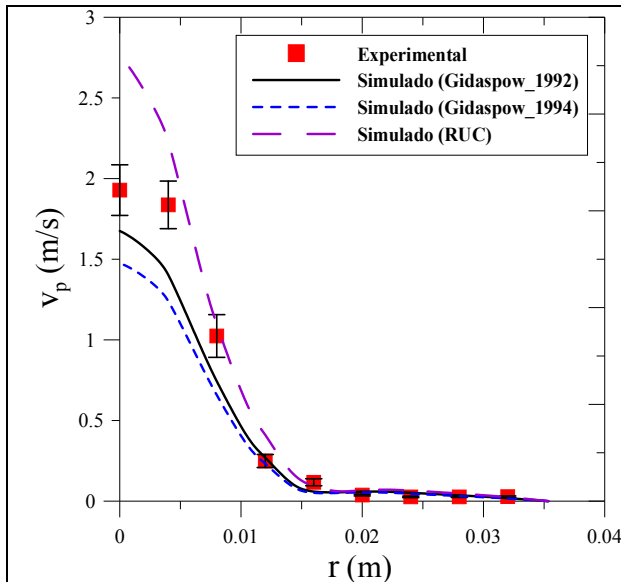


Figura 4.44 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

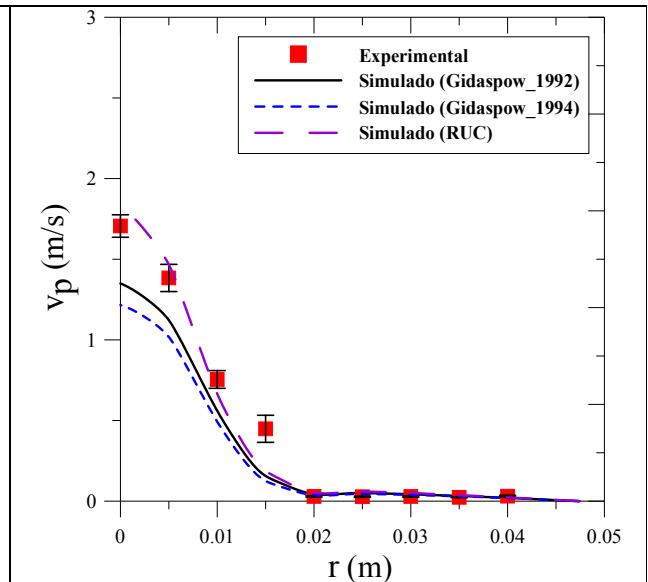


Figura 4.45 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

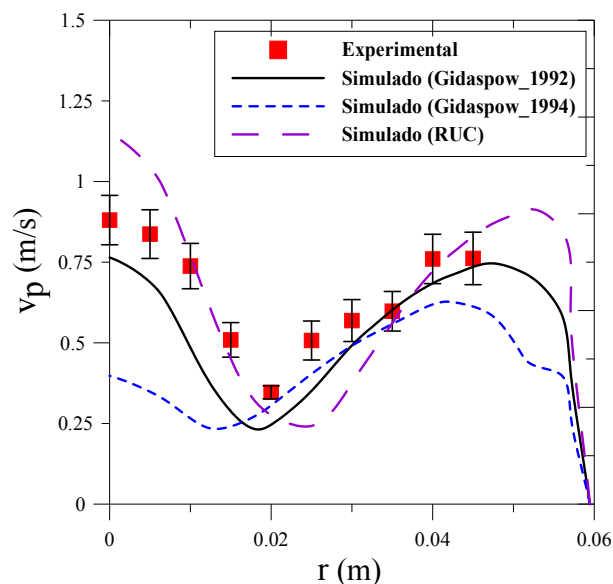


Figura 4.46 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 33 m/s

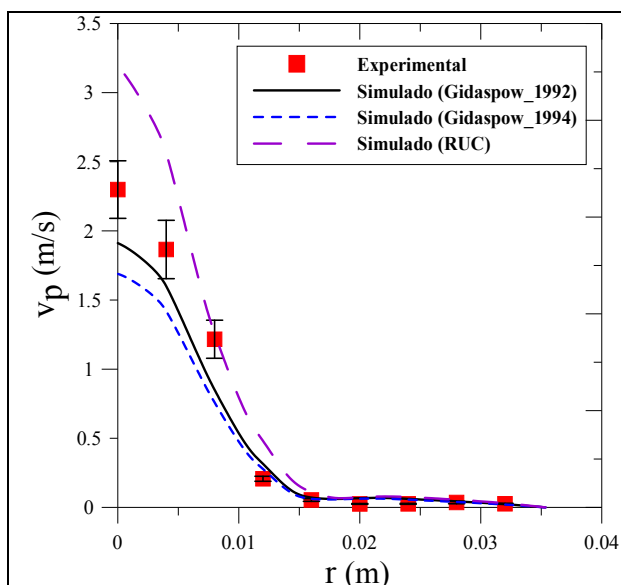


Figura 4.47 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 5,28 cm em relação do leito.

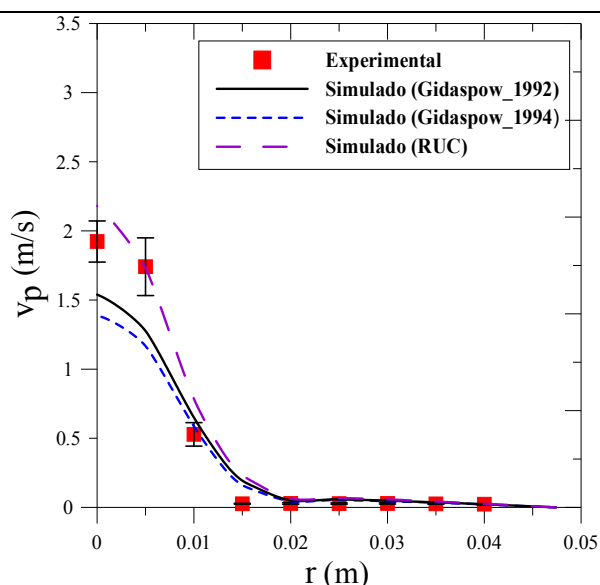


Figura 4.48 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 7,78 cm em relação do leito.

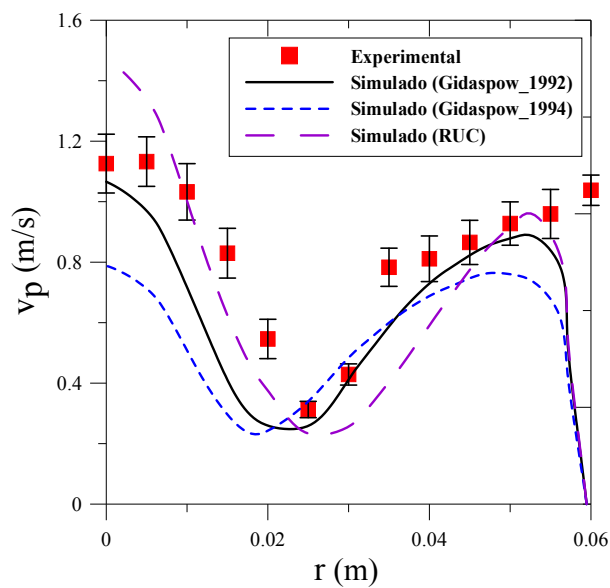


Figura 4.49 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 36 m/s

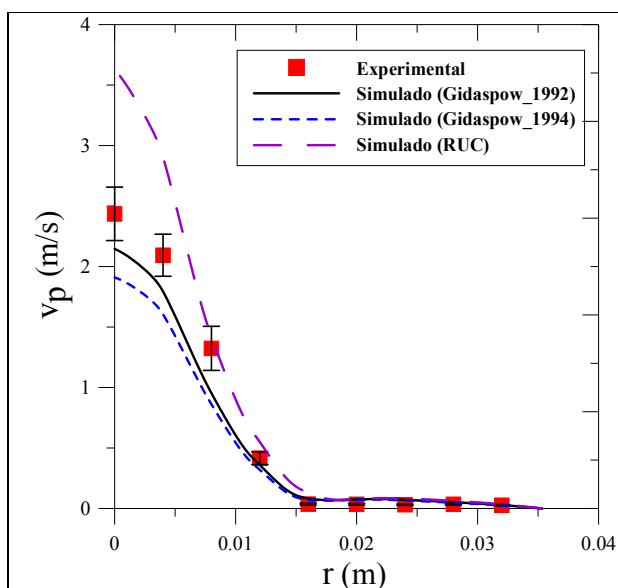


Figura 4.50 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

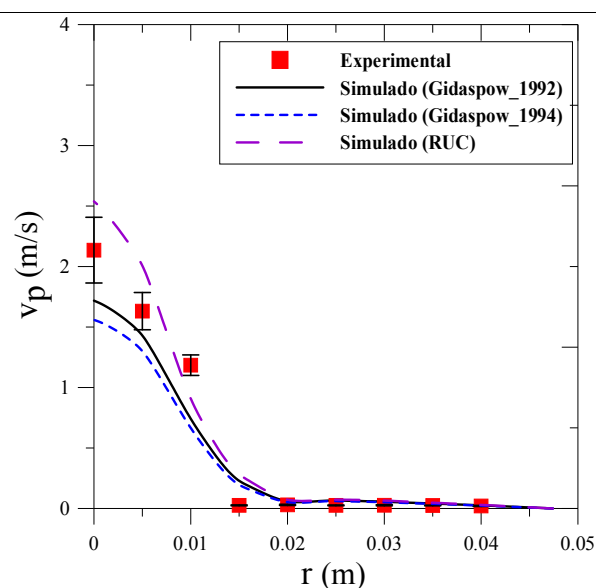


Figura 4.51 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

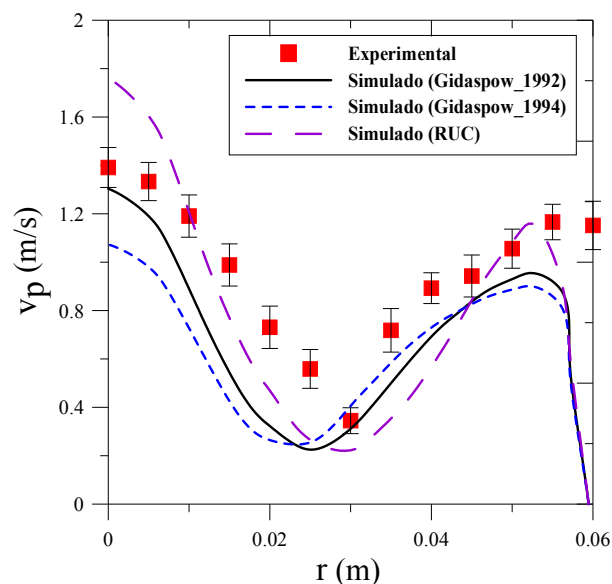


Figura 4.52 – Perfil de velocidade de sólidos para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

Observa-se, a partir dos perfis experimentais e simulados apresentados nas figuras anteriores que, a maior velocidade se dá no centro do leito sendo esta diminuída gradativamente à medida que nos aproximamos da região anular, não se observando, praticamente, nenhuma variação de velocidade próxima à parede do leito, exceto para quando da medida de perfis na região de fonte, que corresponde a uma altura de 14,78 cm da entrada do leito.

Para uma determinada velocidade de ar, à medida que se distancia longitudinalmente da entrada do leito, as velocidades das partículas na região de jorro tendem a diminuir, fato este observado tanto experimental quanto numericamente.

Nota-se uma satisfatória correspondência entre os valores de velocidade de partículas analisadas a uma distância de 5,28 cm e 7,78 cm em relação à entrada do leito, tanto experimentais quanto simulados, para todas as condições de velocidade de ar, na região anular independente do modelo de arraste utilizado.

Verifica-se, através dos perfis de velocidade extraídos na região de fonte (a uma altura de 14,78 cm), que ocorreu uma inversão nos valores de velocidade, diferentemente do comportamento observado nos perfis a outras alturas.

Observa-se, através da Figura 4.52 que a velocidade experimental na parede não atingiu um valor nulo como ocorre para todos os perfis simulados. Isto é devido ao fato de nas simulações realizadas neste trabalho serem adotada a condição de contorno de velocidade zero na parede (*no slip*), forçando desta forma a nulidade da velocidade neste contorno.

Nota-se a grande influência do modelo de arraste nos resultados simulados sendo que quando da utilização do modelo de GIDASPOW (1994) os perfis ficaram sempre abaixo do modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) e este abaixo do modelo RUC na região de jorro.

Os modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) e GIDASPOW (1994) parecem subestimar os valores de velocidade na região de jorro enquanto o modelo RUC superestima os valores de velocidade nesta mesma região.

Nos perfis de velocidade a uma altura de 7,78 cm da entrada, mostrados nas Figuras 4.43, 4.45, 4.48 e 4.51 o modelo RUC descreveu bem o comportamento experimental.

Considerando o fato de que, como mostrado nos resultados sobre a perturbação introduzida pela sonda, a maior diminuição da altura da fonte ocorreu quando a mesma se encontrava no centro do leito, este fato poderia ter causado, também, uma diminuição nos valores de velocidade nesta região. Isto leva a crer que, possivelmente, os valores de velocidades reais de partículas na região de jorro seriam um pouco maiores do que aqueles reportados pela sonda de fibras ópticas.

Para tanto, a Figura 4.53 mostra os perfis de velocidade nas mesmas condições do da Figura 4.43, porém contendo os perfis simulados, utilizando-se dos modelos de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) e RUC (1994), sem e com a introdução da sonda nas mesmas posições do experimental.

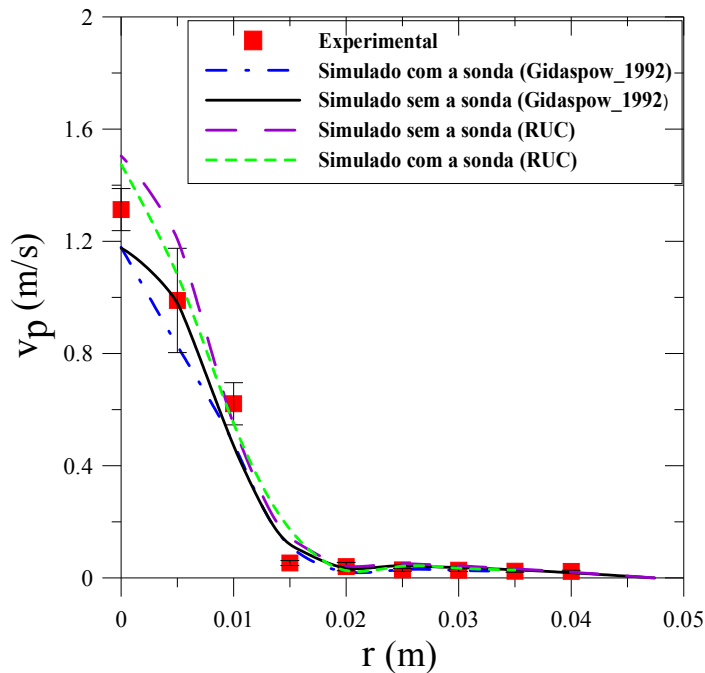


Figura 4.53 – Comparação entre os perfis simulados com e sem a introdução da sonda

Vale ressaltar que o procedimento aqui utilizado, de considerar a influência da presença da sonda na análise numérica dos perfis de velocidade de partículas, não é encontrado na literatura, visto que, os trabalhos nesta linha de pesquisa não levam em consideração a perturbação causada quando da utilização de uma técnica intrusiva.

A partir da Figura 4.53 pôde-se notar que, a introdução da sonda causou uma diminuição das velocidades de partículas simuladas na região de jorro independente do modelo de arraste utilizado. Os perfis de velocidade simulados com o modelo RUC (1994), sem levar em consideração a presença da sonda, se encontravam um pouco acima dos perfis experimentais, como visto nas figuras anteriores. Nota-se, agora, que, com a presença da sonda (Figura 4.53) ocorreu uma melhor correspondência entre o simulado, utilizando-se do modelo RUC (1994), e o experimental. Devido ao fato de os modelos de arraste possuírem uma dependência com a fração volumétrica das fases e, em virtude da presença de um gradiente de concentração acentuado no interior do leito de jorro, isso indica a necessidade de se investigar a utilização de modelos de arraste combinados.

4.7.2 – Perfis de Porosidade

As figuras abaixo mostram os perfis de porosidade utilizando-se de partículas de diâmetros de 1,29 mm e 2,18mm a determinadas condições de velocidade de ar e alturas da entrada do leito, tanto experimentais quanto simulados com diferentes modelos de arraste.

❖ Para esferas de 1,29 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 22 m/s

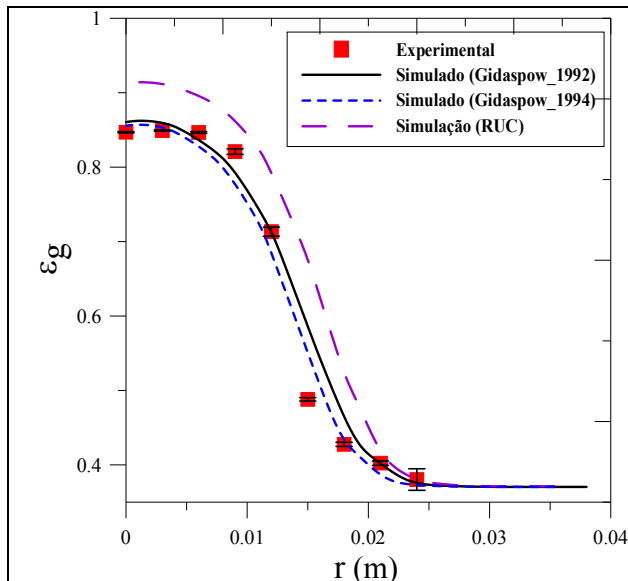


Figura 4.54 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

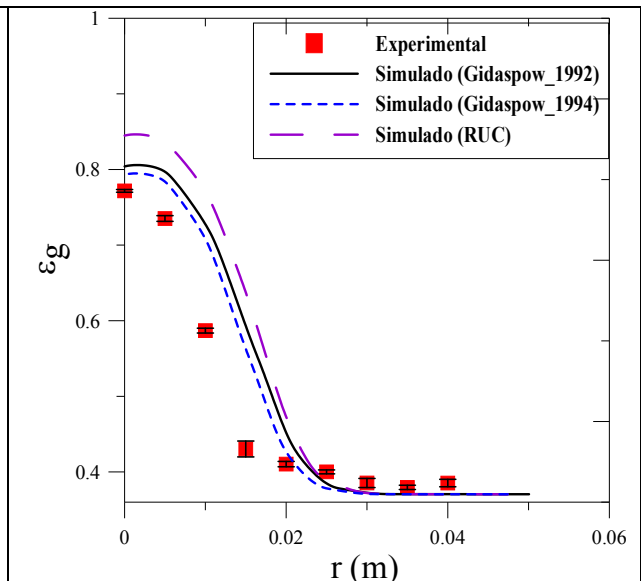


Figura 4.55 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

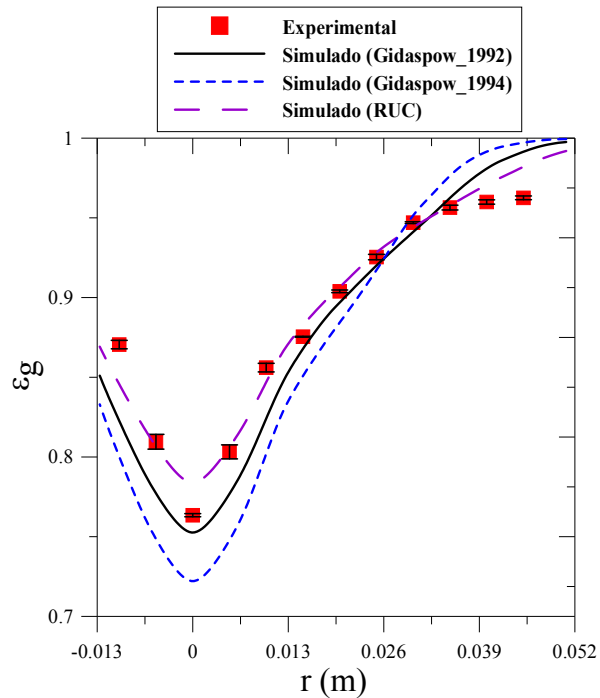


Figura 4.56 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 22 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 1,29 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 24 m/s

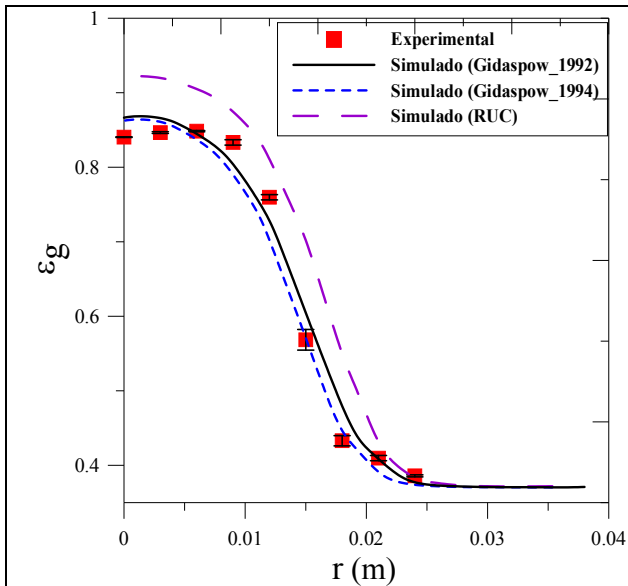


Figura 4.57 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 24 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

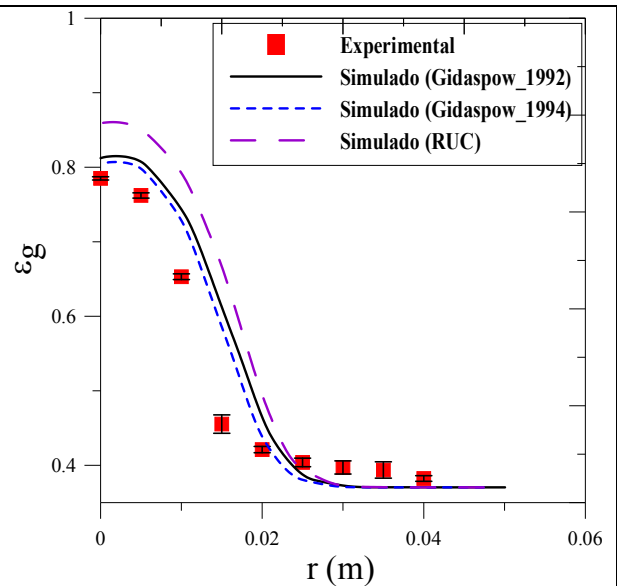


Figura 4.58 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar 24 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

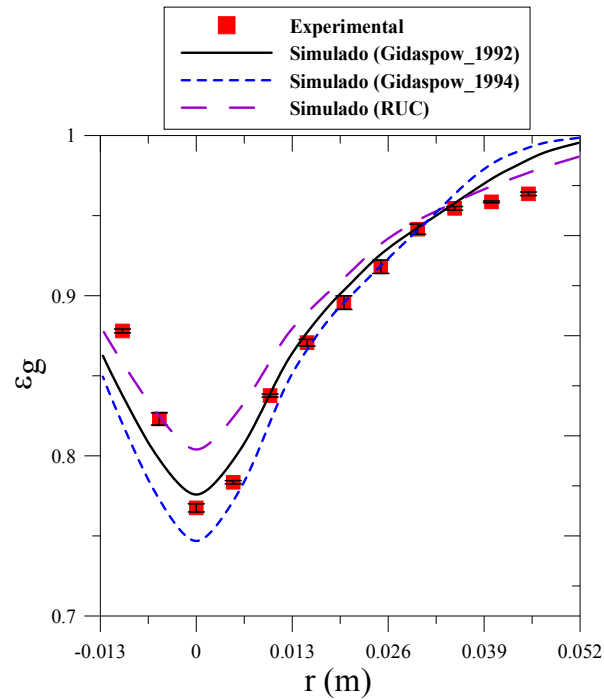


Figura 4.59 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 24 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 1,29 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 26 m/s

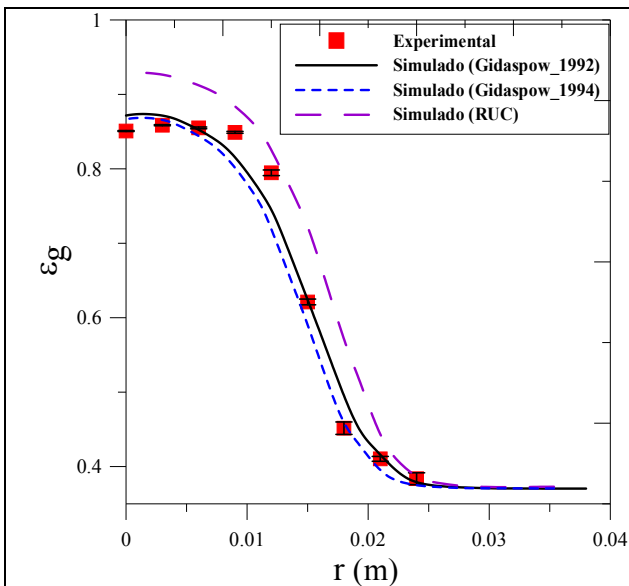


Figura 4.60 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 26 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

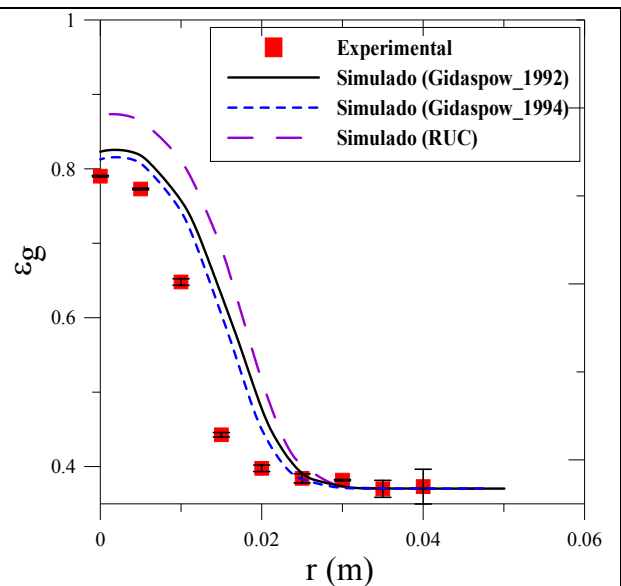


Figura 4.61 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar 26 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

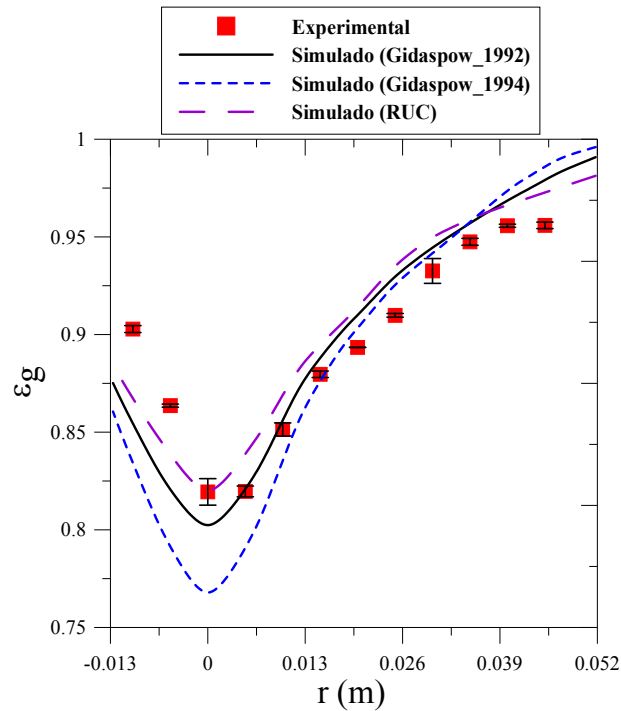


Figura 4.62 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 26 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 1,29 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 28 m/s

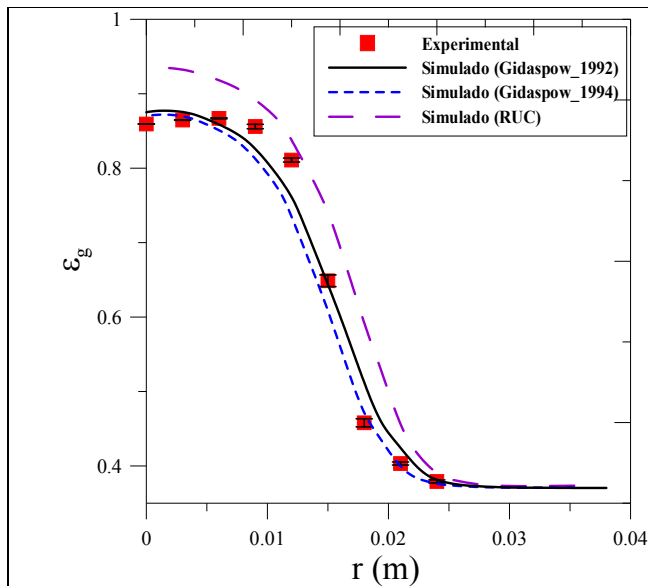


Figura 4.63 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

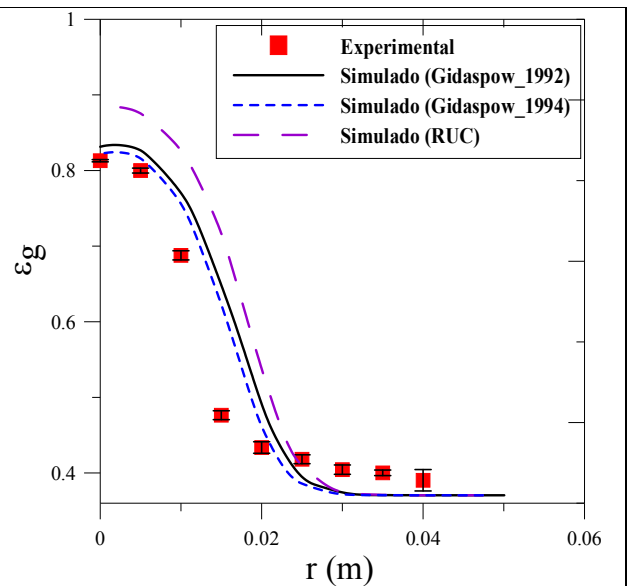


Figura 4.64 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

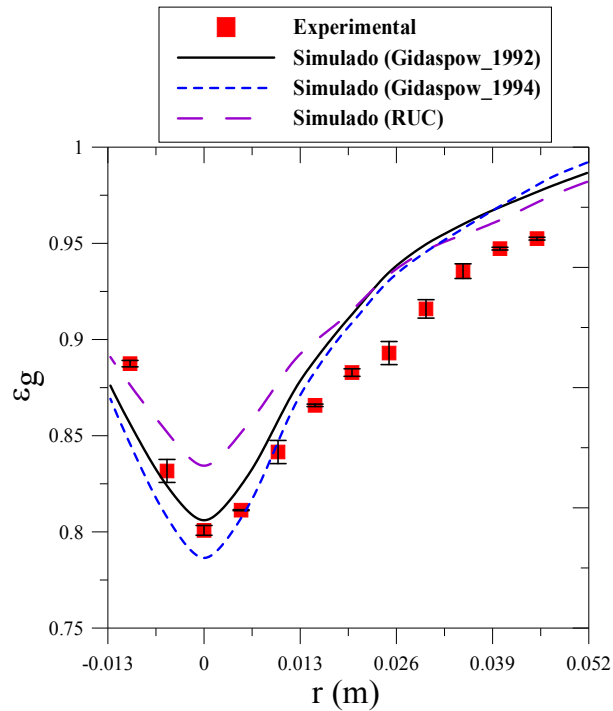


Figura 4.65 – Perfil de porosidade para esferas de 1,29 mm a uma velocidade de ar de 28 m/s e distância de 14,78 cm em relação à entrada do leito (região de fonte).

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 27 m/s

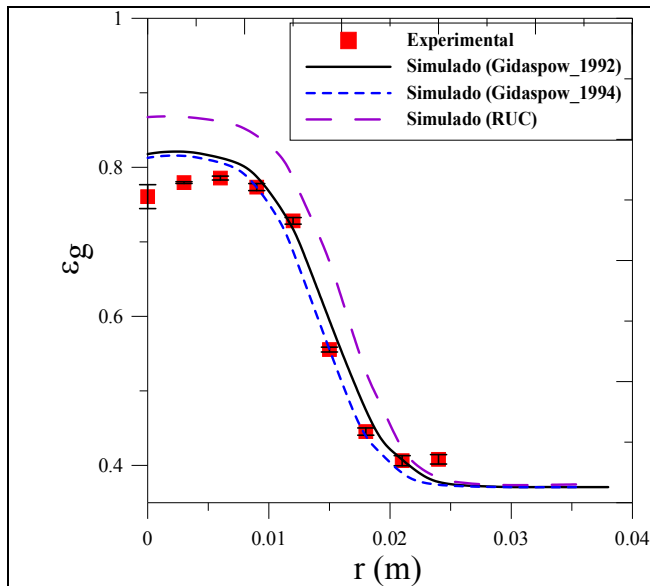


Figura 4.66 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

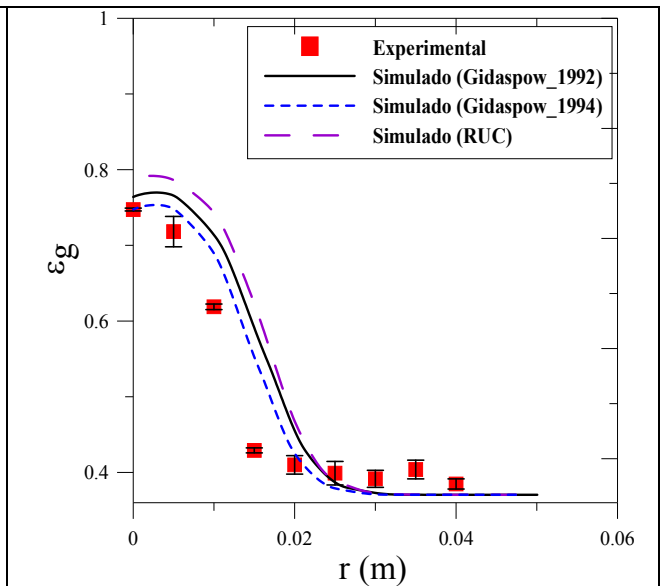


Figura 4.67 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 27 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 30 m/s

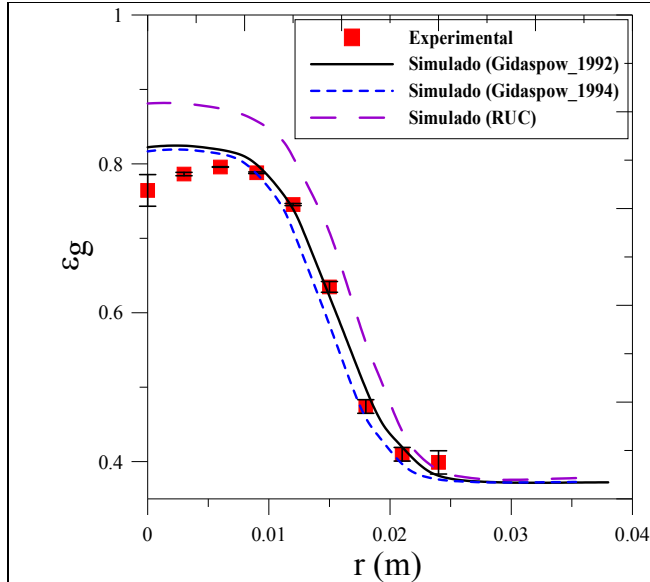


Figura 4.68 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

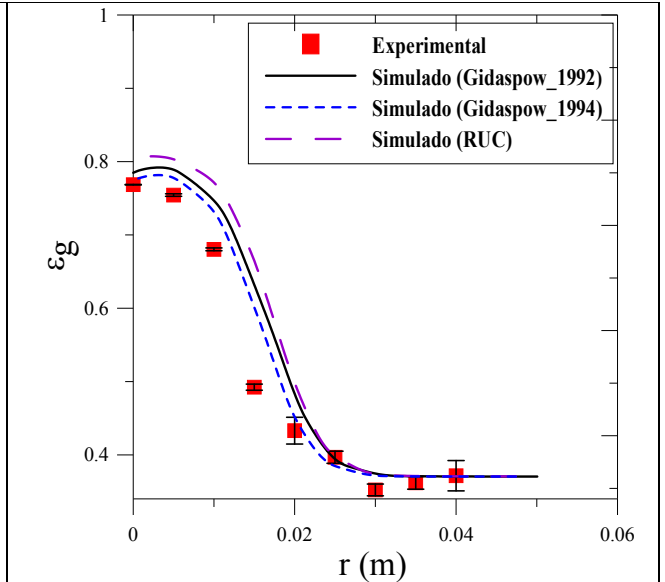


Figura 4.69 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 30 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 33 m/s

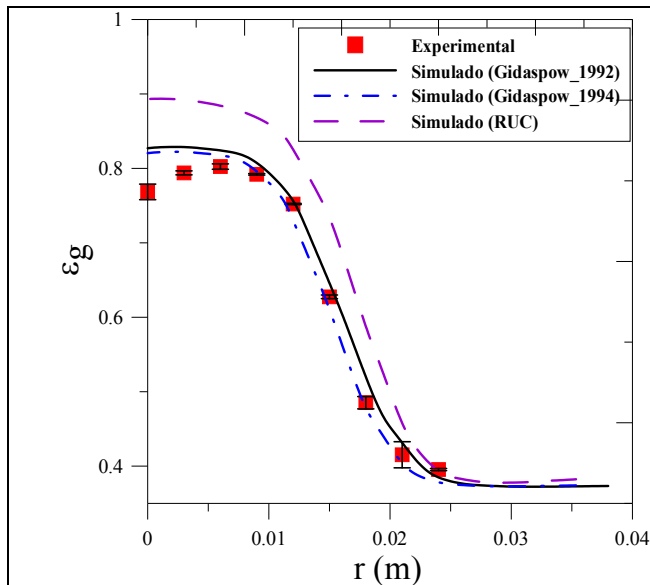


Figura 4.70 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

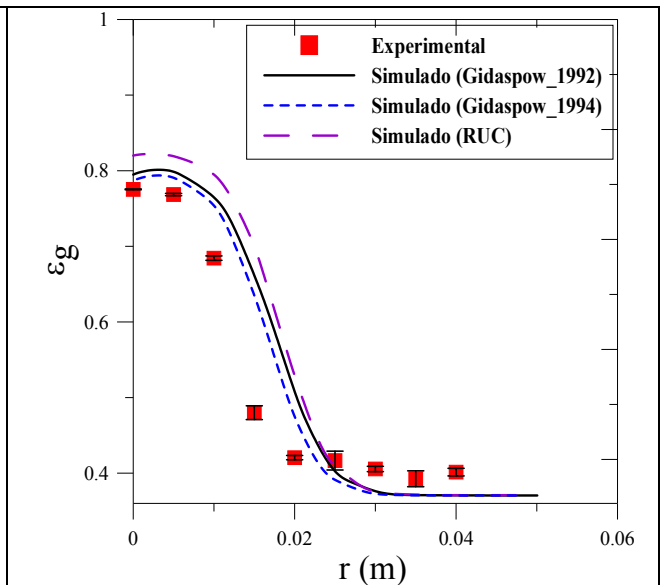


Figura 4.71 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 33 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

❖ Para esferas de 2,18 mm e velocidade de ar na entrada do leito de 36 m/s

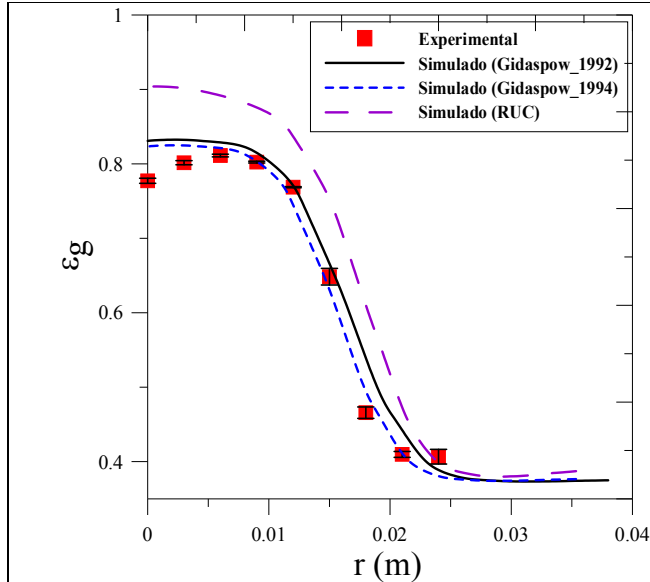


Figura 4.72 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 5,28 cm em relação à entrada do leito.

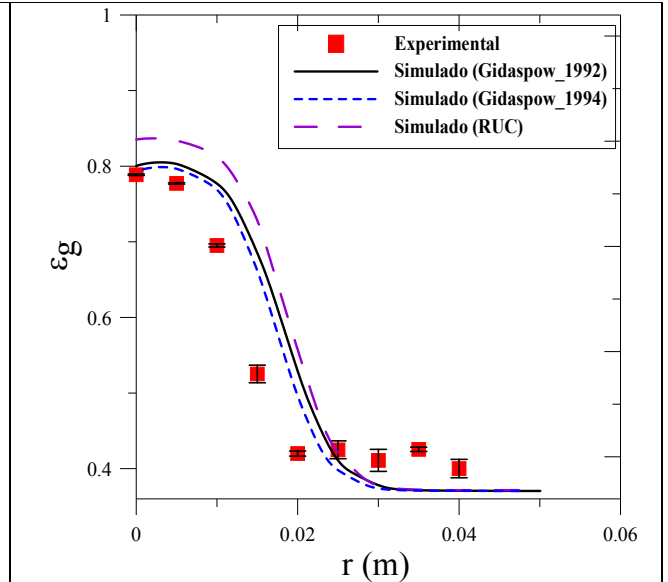


Figura 4.73 – Perfil de porosidade para esferas de 2,18 mm a uma velocidade de ar de 36 m/s e distância de 7,78 cm em relação à entrada do leito.

Observa-se, a partir dos perfis experimentais e simulados apresentados nas figuras anteriores que o maior valor de porosidade ocorreu no centro do leito sendo este diminuído gradativamente à medida que se aproxima da região anular, onde os perfis de porosidade permaneceram praticamente constantes.

Para uma determinada velocidade de ar, à medida que a altura de tomada dos perfis em relação à entrada do leito aumentava, os valores de porosidade diminuíram, fato este observado tanto experimental quanto numericamente.

Houve uma grande correspondência no que diz respeito ao comportamento qualitativo dos perfis de porosidade experimentais e simulados para ambos os valores de diâmetro de esferas, condições de velocidade de ar e alturas em relação à entrada do leito.

Nota-se, semelhantemente aos perfis de velocidade, que quando da utilização do modelo de GIDASPOW (1994) os perfis de porosidade ficaram sempre abaixo do modelo de GIDASPOW *et al.*, (1992) e este abaixo do modelo RUC (1994) na região de jorro.

Os perfis obtidos experimentalmente para a altura de 7,78 cm, independentemente dos valores de diâmetro das partículas ficaram, praticamente, sempre abaixo dos perfis simulados na região de jorro. Já para a altura de 5,28 cm, os perfis simulados utilizando-se dos modelos de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) e Gidaspow (1994) parecem representar

bem o comportamento quantitativo dos perfis experimentais de porosidade, principalmente para esferas de 1,29 mm de diâmetro.

Verifica-se, através dos perfis de porosidade extraídos na região de fonte (a uma altura de 14,78 cm), que o menor valor de porosidade se deu no centro do leito sendo seu valor máximo atingido na parede. Como observado, por exemplo, na Figura 4.56 este comportamento experimental foi descrito satisfatoriamente através dos perfis simulados, sendo o modelo de arraste RUC (1994), o que melhor representou quantitativamente os dados experimentais nestas condições.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1 - Principais Conclusões

- ❖ Foi possível a obtenção de perfis radiais de velocidade e porosidade em um leito de jorro cônico-cilíndrico a alturas em relação à entrada do leito de 5,28 cm, 7,78 cm e 14,78 cm e a diferentes condições de velocidade de ar, para esferas de vidro de diâmetros de 1,29 mm e 2,18 mm utilizando-se do método de fibra óptica;
- ❖ Com relação aos valores de velocidade e porosidade medidos experimentalmente na região de jorro, os mesmos diminuíram na medida em que a altura em relação à entrada do leito aumentava;
- ❖ Foi possível a análise experimental, tanto qualitativa quanto quantitativa, da perturbação ao escoamento em um leito de jorro em virtude da introdução da sonda de fibra óptica através da observação do deslocamento e da variação da altura da fonte, sendo a perturbação de maior intensidade detectada na região de jorro e na região de transição entre esta e a região anular;
- ❖ A máxima variação da altura da fonte observada quando da introdução da sonda foi quando a mesma se encontrava no centro do leito, sendo esta variação de aproximadamente 2,0 cm para todas as condições;
- ❖ Verificou-se uma grande influência do modelo de arraste nos resultados simulados sendo que, tanto para os perfis de velocidade quanto para os de porosidade, quando da utilização do modelo de GIDASPOW (1994) se encontravam sempre abaixo do modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) e este abaixo do modelo RUC na região de jorro;
- ❖ Para os perfis de velocidade, os modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) e GIDASPOW (1994) parecem subestimar os valores de velocidade na região de jorro enquanto o modelo RUC superestima os valores de velocidade nesta mesma região, sendo que, na região

anular tanto os perfis experimentais quanto os simulados, com diferentes modelos de arraste, mostraram-se próximos;

- ❖ Foi possível, para todas as condições analisadas, prever através da análise dos perfis de fração volumétrica de sólidos simulados, nas mesmas condições do experimental, a perturbação causada pela introdução da sonda ao escoamento, verificando uma satisfatória correspondência entre estes e o experimental;
- ❖ Para os perfis de velocidade simulados com a introdução da sonda utilizando-se os modelos de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) e RUC (1994), observou-se uma pequena diminuição das velocidades de partículas, sendo esta mais pronunciada na região de jorro. Porém, a velocidade máxima que se encontra no centro do leito permaneceu praticamente a mesma de quando da não introdução da sonda;
- ❖ Vale ressaltar a importância da verificação correta de um modelo antes de qualquer implementação, pois, como dito antes, o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) foi redigido de forma equivocada no manual do software Fluent[®], ocasionando pequenas diferenças entre os resultados simulados principalmente a velocidades relativamente baixas, possivelmente, devido à ausência da dependência de C_D com o número de Reynolds;
- ❖ A análise de perturbação mostrou-se de fundamental importância quando da simulação de perfis de propriedades do escoamento obtidos experimentalmente por uma técnica intrusiva, pois, na prática os trabalhos sobre simulações encontrados na literatura não levam o fenômeno da perturbação em consideração.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, que poderão complementar o estudo aqui realizado.

- ❖ Realizar medidas experimentais de perfis de velocidade e porosidade para mistura de partículas utilizando-se da sonda de fibras ópticas;
- ❖ Investigar os efeitos da utilização de diferentes modelos friccionais nos perfis simulados de velocidade e porosidade;
- ❖ Utilizar a abordagem de modelos de arraste híbridos ou combinados.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUADO, R.; OLAZAR, M.; SAN JOSE, M. J.; AGUIRRE, G.; BILBAO, J., Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor. Yields and product composition, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 39(6), p. 1925-1933, 2000.
- AMOS, G.; RHODES, M.J.; BENKREIRA, H., Calculation of optic fibres calibration curves for the measurement of solids volume fractions in multiphase flows, Powder Technology, vol. 88, p. 107-121, 1996.
- ARASTOPOUR, H.; PAKDEL, P.; ADEWUMI, M., Hydrodynamic analysis of dilute gas-solids flow in a vertical pipe, Powder Technology, vol. 62 (2), p. 163-170, 1990.
- BACELOS, M. S. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas, Tese de Doutorado, PPGEQ/UFSCAR – São Carlos/SP, 2006, 113p.
- BAGNOLD, R. A., Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear, Proc. Roy. Soc. Lond., A 255, p. 49-63, 1954.
- BARRI, G.; PETER, V.; KURT, K., Measurement of gas and liquid velocities in an air-water two-phase flow using cross-correlation of signals from a double sensor hot-film probe, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 28, p. 495-504, 2004.
- BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R.; Epstein, Norman; Grace, J.R.; Lim, C.J., Experimental and CFD Study of Dense-Phase, Transition Region and Dilute-Phase Spouting, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 49, p. 5102-5109, 2010.
- BERGOUGNOUX, L.; Jean-Luc Firpo, Jacqueline Misguich-Ripault, Optical fiber sensor for measuring high particle concentrations, Powder Technology, vol. 105, p.413-417, 1999.
- BERGOUGNOUX, L.; MISGUICH-RIPAULT, J.; FIRPO, J. L.; ANDRE, J., Monte Carlo calculation of backscattered light intensity by suspension: comparison with experimental data, Applied Optics, vol. 35, p. 1735-1741, 1996.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N., Transport Phenomena, New York: John Wiley & Sons, 1960.
- BOIARSKI, A. A., Fiber Optic Particle Concentration Sensor, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Fiber Optic and Laser Sensor III, SPIE Proc., vol. 566, p. 122-125, 1985.
- CASTILHO, G. J., CREMASCO, M. A.; BRAGA, N. P., Técnicas de medidas para o estudo da fluidodinâmica em sistemas particulados: estudo da arte, Anais do XXXII Congresso Brasileiro em Sistemas Particulados, Maringá-PR, 2006.

- CHAPMAN, S.; COWLING, T. G., The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1970.
- CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E., Bubbles, drops and particles, Academic Press, New York, 1978.
- DAN, S.; SHUYAN, W.; GOUGDONG, L.; SHUAI W.; YONGJIAN, L.; LIXIN, W., Simulations of flow behavior of gas and particles in a spouted bed using a second-order moment method-frictional stresses model, Chemical Engineering Science, vol. 65, p. 2635–2648, 2010.
- DARBY, R., Chemical Engineering Fluid Mechanics, New York: Marcel Dekker, Second Edition, 2001.
- DARTEVELLE, S., Numerical and granulometric approaches to geophysical granular flows, Ph.D. thesis, Michigan Technological University, Department of Geological and Mining Engineering, Houghton, Michigan, 2003.
- DING, J.; GIDASPOW, D., A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow, AIChE J., vol. 36(4), p. 523-538, 1990.
- DU PLESSIS J. P., Analytical Quantification of Coefficients in the Ergun Equation for Fluid Friction in a Packed Bed, Transport in Porous Media, vol. 16, p. 189-207, 1994.
- DU, B.; WEI, F., Lateral solids mixing behavior of different particles in a riser with FCC particles as fluidized material, Chemical Engineering and Processing, vol. 41, p. 329–335, 2002.
- DU, W.; BAO, X.; XU, J.; WEI, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations, Chemical Engineering Science, vol.61, p. 1401–1420, 2006.
- DUARTE, C. R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro, Tese de Doutorado, PPGEQ/UFU – Uberlândia/MG, 194p, 2006.
- DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S., A study of the fluid dynamics of the spouted bed using CFD, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 22, No. 02, p. 263 – 270, 2005.
- DUARTE, C. R.; OLAZAR, M.; MURATA, V.V.; BARROZO, M. A. S., Numerical simulation and experimental study of fluid–particle flows in a spouted bed, Powder Technology, vol. 188, p. 195–205, 2009.
- GIDASPOW, D., Multiphase flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions, California: Academic Press, INC., 1994.
- GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J., Hydrodynamics of circulating fluidized beds: Kinetic theory approach, In Fluidization VII, ed. O. E. Potter & D.J. Nicklin, p. 75-82, Engineering Foundation, 1992.

- GRYCZKA, O.; HEINRICH, S.; DEEN, N. G.; ANNALAND, M. V. S.; KUIPERS, J. A. M.; MÖRL, L., CFD Modeling of a Prismatic Spouted Bed with Two Adjustable Gas Inlets, The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 87, p. 318–328, 2009.
- HAGE, B.; WERTHER, J., The guarded capacitance probe – a tool for the measurement of solids flow patterns in laboratory and industrial fluidized bed combustors, Powder Technology, vol. 93, p. 235-245, 1997.
- HARTGE, E.U.; LI, Y.; WERTHER, J., Flow structures in fast fluidized beds, Fluidization V, p. 345–352, 1986.
- HARTGE, E.U.; RENSNET, D.; WERTHER, J., Solids concentration and velocity in circulating fluidized beds, In Circulating Fluidized Bed Technology II, Pergamon Press, p. 165-180, New York, U.S.A, 1988.
- HARUN, B., Accuracy analysis of the window overlapping technique for velocity measurements using artificial and real signals, Powder Technology, vol. 201, p. 138-145, 2010.
- HE, Y. L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R.; ZHU, J. X.; QIN, S. Z. Measurements of Voidage Profiles in Spouted Beds, Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 72, p. 229-234, 1994.
- HORIO, M.; MORISHITA, K.; TACHIBANA, O.; MURUTA, N., Solid Distribution and Movement in Circulating Fluidized beds, Circulating Fluidized Bed Technology II, P. Basu and J. F. Large, Pergamon Press, Oxford, UK, p. 145–15, 1988.
- HORIO, M.; TAKI, A.; HSIEH, Y.S.; MUCHI, I., Elutriation and particle transport through the freeboard of a gas-solid fluidized bed, In Fluidization, ed. Grace and Matsen New York, Plenum, p. 509-518, 1980.
- HUILIN, L.; YONGLI, S.; YANG, L.; YURONG, H.; BOUILLARD, J., Numerical simulations of hydrodynamic behavior in spouted beds, Chemical Engineering Research and Design, vol. 79, p. 593-599, 2001.
- HUILIN, L.; YURONG, H.; WENTIE, L.; Ding, J.; GIDASPOW, D.; BOUILLARD, J., Computer simulations of gas–solid flow in spouted beds using kinetic–frictional stress model of granular flow, Chemical Engineering Science, vol. 59, p. 865 – 878, 2004.
- JENKINS, J. T., SAVAGE, S. B., A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic sphere particles, J. Fluid Mech., vol. 130, p. 187 – 202, 1983.
- JING, S.; HU, Q. Y.; WANG, J. F.; JIN, Y., Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds, Chem. Eng. Process., vol. 39, p. 379-387, 2000.
- JOHANSSON, K.; NORLING, R.; HJORNHEDE, A.; ALMSTEDT, A –E.; JOHNSON, F.; NYLUND, A., Hydrodynamics and steel tube wastage in a fluidized bed at elevated temperature, Chemical Engineering Science, vol. 59, p. 31 – 40, 2004.

- JOHNSON, P. C., JACKSON, R., Frictional-collisional constitutive relations for granular materials with application to plane shearing, J. Fluid Mech., vol. 176, p. 67 – 93, 1987.
- JOHNSON, P. C.; NOTT, P.; JACKSON R., Frictional-collisional equations of motion for particulate Flows and their application to chutes, Journal of Fluid Mechanics, vol. 210, p. 501-535, 1990.
- KAWAGUCHI, T.; SAKAMOTO, M.; TANAKA, T.; TSUJI, Y., Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, Powder Technology, vol. 109(1-3), p. 3-12, 2000.
- KMIEC, A.; SZAFRAN, R.G., Kinetics of drying of microspherical particles in a spouted bed dryer with a draft tube, In Proceedings of the Twelfth International Drying Symposium, Noordwijkerhout, The Netherlands, 2000.
- KUCHARSKI, J.; KMIEC, A., Hydrodynamics, heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed, Can. J. Chem. Eng., vol. 61(3), p. 435-439, 1983.
- LIMTRAKUL, S.; BOONSRIRAT, A.; VATANATHAM, T., DEM modeling and simulation of a catalytic gas-solid fluidized bed reactor: a spouted bed as a case study, Chemical Engineering Science, vol. 59(22-23), p. 5225-5231, 2004.
- LISCHER, D. J.; LOUGE, M.Y., Optical fiber measurement of particle concentration in dense suspensions: calibration and simulation, Applied Optics, vol. 31, p. 5106-5113, 1992.
- LU, H.-L.; HE, Y.-R.; LIU, W.-T.; DING, J.-M.; GIDASPOW, D.; BOUILLARD, J., Computer simulations of gas-solid flow in spouted beds using kinetic-frictional stress model of granular flow, Chem. Eng. Sci., vol. 59(4), p. 865-878, 2004.
- LUN, C. K. K., SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N., Kinetic theories for granular flow: Inelastic particles in coquette flow and singly inelastic particles in a general flow field, J. Fluid Mech., vol. 140, p. 223 – 256, 1984.
- LUNDBERG, J., CFD study of a bubbling fluidized bed, M.Sc. Programme, Telemark University College, Faculty of technology, Porsgrunn, Norway, 2008.
- MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W., Hidrodynamic characteristics of jet-spouted beds, Can. J. Chem. Eng., vol. 61, p. 377-381, 1983.
- MARNASIDOU, K. G.; VOUTETAKIS, S. S.; TJATJOPOULOS, G. J.; VASALOS, I. A., Catalytic partial oxidation of methane to synthesis gas in a pilot-plant-scale spouted-bed reactor, Chem. Eng. Sci., vol. 54(15-16), p. 3691-3699, 1999.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N., Spouted beds, Academic Press Inc. LTD., New York, 304p., 1974.
- MATSUNO, Y.; YAMAGUCHI, H.; OKA, T.; KAGE, H.; HIGASHITANI, K., The use of optic fiber probes for the measurement of dilute particle concentrations: calibration and application to gas- fluidized bed carryover, Powder Technol., vol. 36, p. 215-221, 1983.

- MILITZER, J.; HEBB, J.P.; JOLIMORE, G.; SHAKNOURZADEH, K., Fluidization VII, Engineering Foundation, New York, p. 763–769, 1992.
- NICOLAI, R.; REH, L., Measurements of solids concentration, velocity and momentum distribution in a cold CFB unit, Proceedings of the 13th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, ASME, vol. 1, 1995.
- OCONE R., SUNDARESAN S.; JACKSON R., Gas-particle flow in a duct of arbitrary inclination with particle-particle interaction, AIChE J., vol. 39, p. 1261-1271, 1993.
- OKI, K.; AKEHATA, T.; SHIRAI, T., A new method for evaluating the size of moving particles with a fiber optic probe, Powder Technology, vol. 11, p. 51-57, 1975.
- OKI, K.; ISHIDA, M.; SHIRAI, T., The behavior of jets and particles near the gas distributor grid in a three-dimensional fluidized bed, In Fluidization, ed. JR Grace and JM Matsen, Plenum, New York, p. 421-428, 1980.
- OKI, K.; WALAWENDER, W.P.; FAN, L.T., The measurement of local velocity of solid particles, Powder Technology, vol. 18, p. 171-178, 1977.
- OLAZAR, M.; AGUADO, R.; SAN JOSE, M. J.; BILBAO, J., Performance of a conical spouted bed in biomass catalytic pyrolysis, Recents Progres en Genie des Procedes, vol. 14(76), p. 499-506, 2000.
- OLAZAR, M.; SAN JOSE, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANTES, J. M.; BILBAO, J., Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds, Ind. Eng. Chem. Res., vol. 31, p. 1784-1793, 1992.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J., Local bed voidage in conical spouted beds, Ind. Eng. Chem., vol. 37, p. 2553-2558, 1998.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; MORALES, A.; BILBAO, J., Measurement of particle velocities in conical spouted beds using an optical fiber probe, Ind. Eng. Chem., vol. 37, p. 4520-4527, 1998.
- OLSON, S. E.; WIMAN, J.; ALMSTEDT, A. E., Hydrodynamics of a pressurized fluidized bed with horizontal tubes: influence of pressure fluidization velocity and tube – bank geometry, Chemical Engineering Science, vol. 50, n. 4, p. 581-592, 1995.
- PASSOS, M. L.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S.; FREITAS, M. E. A.; MASSARANI, G.; BARROZO, M. A. S., Spouted bed units for anatto powder production, Inter-American Drying Conference, Itu-SP, Brazil, vol. A, p. 181-1888, 1997.
- PATANKAR S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- QIN, S., AND LIU, G., Application of optical fibers to measurement and display of fluidized systems, in Fluidization Science and Technology (Kwauk, M., and Kunii, D., eds.), China, p.258, 1982.

- RICHARDSON, J.R., ZAKI, W.N., Sedimentation and fluidization: part I, Transactions of Institute of Chemical Engineering, vol.32 (1), p. 35–53, 1954.
- ROVERO, G.; BRERETON, C. M. H.; EPSTEIN, N.; GRACE, J. R.; CASALEGNO, L.; PICCININI, N., Gas flow distribution in conical-base spouted beds, Can. J. Chem. Eng., vol. 61(3), p. 289-296, 1983.
- SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; ALVAREZ, S.; MORALEZ, A.; BILBAO, J., Local porosity in conical spouted beds consisting of solids of varying density, Chemical Engineering Science, vol. 60, p. 2017-2025, 2005.
- SAVAGE, S. B., Granular flows down rough inclines - review and extension. In Mechanics of Granular Materials: New Models and Constitutive Relations (ed. J. T. Jenkins & M. Satake), Elsevier Science Publishers, p. 261 – 82, 1983.
- SAVAGE, S. B., JEFFREY, D. J., The stress tensor in a granular flow at high shear rates, J. Fluid Mech., vol. 110, p. 255 – 272, 1981.
- SCHAEFFER, G., Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow, J. Differential Equations, vol. 66, p. 19–50, 1987.
- SCHILLER, L.; NAUMANN, Z., A drag coefficient correlation, Ver. Deutsch. Ing. 77, 318 p., 1935.
- SHAHINPOUR, M., AHMADI, G., A kinetic theory for the rapid flow of rough identical spherical particles and the evolution of fluctuation: Advances in the mechanics and the flow of granular materials II, pp. 641 – 667 in M. Shahipour, Ed. Trans. Tech. Pub. Switzerland: Andermannsdorf, 1983.
- SHUYAN, W., XIANG L., HUILIN L., LONG Y., DAN S., YURONG H., YONGLONG D., Numerical simulations of flow behavior of gas and particles in spouted beds using frictional-kinetic stresses model, Powder Technology, vol. 196, p. 184–193, 2009.
- SNOEK, C.W., A selection of new developments in multiphase flow measurement techniques, Exp. Thermal Fluid Sci., vol. 3, p. 60-73, 1990.
- SRIVASTAVA, A.; SUNDARESAN, S., Analysis of a frictional–kinetic model for gas-particle flow, Powder Technology, vol. 129, p. 72-85, 2003.
- SYAMLAL, M., O'BRIEN, T.J., Simulation of granular layer inversion in liquid fluidized beds, International Journal of Multiphase Flow, vol.14 (4), 473–481, 1988.
- SYAMLAL, M.; ROGERS, W.; O'BRIEN, T. J., MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993.
- SZAFRAN, R. G.; KMIEC, A., CFD Modeling of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Dryer, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 43(4), p. 1113-1124, 2004.
- TAYLOR, G.I., Proc. R. Soc. London, Ser. A 164, 476, 1938.

- TOWNSEND, A. A., The measurement of double and triple correlation derivatives in isotropic turbulence, Proc. Cambridge Philos. Soc., vol. 43, 560 pp, 1947.
- UEMAKI, O. AND TSUJI, T., Gasification of a sub-bituminous coal in a two-stage, jet-spouted bed reactor, in Fluidization V: Proceedings of the Fifth Engineering Foundation Conference on Fluidization, Engineering Foundation, New York, p. 497-504, 1986.
- WANG, Z., Experimental studies and cfd simulations of conical spouted bed hydrodynamics, Ph.D. thesis, The University of British Columbia, Department of Chemical and Biological Engineering, 2006.
- WANG, Z.; BI, H. T.; LIM, C. J., CFD Simulation of Spouted Beds Using a Pressure Source Term, Ind. Eng. Chem., vol. 49, p. 5053–5060, Res. 2010.
- WARBITO, M.; OHKAWA, N.; KAWATA, S. UCHIDA, Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography, Chemical Engineering Science, vol. 54, p. 4711-4728, 1999.
- WERTHER, J., Measurement techniques in fluidized beds, Powder Technology, vol. 102 p. 15–36, 1999.
- WERTHER, J.; HAGE, B.; RUDNICK, C., A comparison of laser Doppler and single-fibre reflection probes for the measurement of the velocity of solids in a gas-solid circulating fluidized bed, Chemical Engineering and Processing, vol. 35, p. 381- 391, 1996.
- WERTHER, J.; SCHLICHTHAERLE, P., Axial pressure profiles and solids concentration distributions in the CFB bottom zone. Chemical Engineering Science, vol. 54, p. 5485-5493, 1999.
- YANG, Y. L.; JIN Y.; YU Z. Q.; ZHU J. X.; BI H. T., Local slip behaviors in the circulating fluidized bed, AIChE Symp. Ser., vol. 81, 296 pp, 1993.
- ZHANG, H.; JOHNSTON, P.M.; ZHU, J.X.; DE LASA, H.I.; BERGOUGNOU, M.A., A novel calibration procedure for a fiber optic solids concentration probe, Powder Technol., vol. 100 (2–3), p. 260–272, 1998.
- ZHONGHUA, W.; MUJUMDAR, A. S., CFD modeling of the gas–particle flow behavior in spouted beds, Powder Technology, vol. 183, p. 260–272, 2008.
- ZHU, J. -X.; LI, G.-Z.; QIN, S.-Z.; LI, F. -Y.; ZHANG, H.; YANG, Y. -L., Direct measurements of particle velocities in gas–solids suspension flow using a novel five-fiber optical probe, Powder Technology, vol. 115, p. 184-192, 2001.

APÊNDICES

Apêndice I – Código para o Modelo de Arraste de Gidaspow (1994)

```
#include "udf.h"
#define pi 4.*atan(1.)
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY(gidaspow_trans,cell,mix_thread,s_col,f_col)
{
  Thread *thread_g, *thread_s;
  real x_vel_g, x_vel_s, y_vel_g, y_vel_s, abs_v, z_vel_s, z_vel_g, slip_x, slip_y, rho_g, slip_z, rho_s,
  mu_g, reyp, cd, void_g, void_s, k_g_s, diam2, k_g_w, k_g_e, ang;
  diam2 = 0.00218;
  thread_g = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, s_col);
  thread_s = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, f_col);
  x_vel_g = C_U(cell, thread_g);
  y_vel_g = C_V(cell, thread_g);
  x_vel_s = C_U(cell, thread_s);
  y_vel_s = C_V(cell, thread_s);
  z_vel_s = C_W(cell, thread_s);
  z_vel_g = C_W(cell, thread_g);
  slip_x = x_vel_g - x_vel_s;
  slip_y = y_vel_g - y_vel_s;
  slip_z = z_vel_g - z_vel_s;
  rho_g = C_R(cell, thread_g);
  rho_s = C_R(cell, thread_s);
  mu_g = C_MU_L(cell, thread_g);
  abs_v = sqrt(slip_x*slip_x + slip_y*slip_y + slip_z*slip_z);
  void_g = C_VOF(cell, thread_g);
  void_s = C_VOF(cell, thread_s);
  reyp = rho_g*abs_v*diam2/mu_g;
  if (reyp < 1000.0)
    cd = 24.0/(reyp*void_g)*(1.0+0.15*pow(reyp,0.687)*pow(void_g,0.687));
  else
    cd = 0.44;
  if (void_g >= 0.8)
    k_g_w = 3.0/4.0*cd*void_s*void_g*rho_g*abs_v*pow(void_g,-2.65)/diam2;
  else
    k_g_e = 150.0*void_s*(1.0-void_g)*mu_g/(void_g*diam2*diam2)+1.75*rho_g*void_s*abs_v/diam2;
  ang = (atan(150.0*1.75*(0.2-void_s))/pi) + 0.5;
  k_g_s = ang*k_g_w + (1-ang)*k_g_e;
  return k_g_s;
}
```

Apêndice II – Código para o Modelo de Arraste RUC (1994)

```
#include "udf.h"
#define pi 4.*atan(1.)
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY(drag_ruc, cell, mix_thread, s_col, f_col)
{
  Thread *thread_g, *thread_s;
  real x_vel_g, x_vel_s, y_vel_g, y_vel_s, z_vel_g, z_vel_s, abs_v, slip_x, slip_z, slip_y, rho_g, mu_g, aruc, bruc,
  void_g, void_s, k_g_s, he, het;
  diam2 = 0.00218;
  thread_g = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, s_col);
  thread_s = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, f_col);
  x_vel_g = C_U(cell, thread_g);
  y_vel_g = C_V(cell, thread_g);
  x_vel_s = C_U(cell, thread_s);
  y_vel_s = C_V(cell, thread_s);
  z_vel_s = C_U(cell, thread_s);
  z_vel_g = C_V(cell, thread_g);
  slip_x = x_vel_g - x_vel_s;
  slip_y = y_vel_g - y_vel_s;
  slip_z = z_vel_g - z_vel_s;
  rho_g = C_R(cell, thread_g);
  mu_g = C_MU_L(cell, thread_g);
  abs_v = sqrt(slip_x*slip_x + slip_y*slip_y + slip_z*slip_z);
  void_g = C_VOF(cell, thread_g);
  void_s = C_VOF(cell, thread_s);
  he = pow(1.-void_g, (2./3.));
  het = pow(1.-void_g, (1./3.));
  if(void_g > 0.99)
    aruc = 785.0;
  else
    aruc = (26.8*void_g*void_g*void_g)/(he*(1.-het)*(1.-he)*(1.-he));
  if(void_g > 0.01)
    bruc = (void_g*void_g)/((1.-he)*(1.-he));
  else
    bruc = 2.25;
  k_g_s = aruc*void_s*(1-void_g)*mu_g/(void_g*pow(diam2, 2.)) + bruc*rho_g*void_s*abs_v/diam2;
  return k_g_s;
}
```

Apêndice III – Código para o Modelo de Arraste Gidaspow contido no Manual do Software Fluent[®]

```
#include "udf.h"
#define pi 4.*atan(1.)
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY(gidaspow_manual,cell,mix_thread,s_col,f_col)
{
  Thread *thread_g, *thread_s;
  real x_vel_g, x_vel_s, y_vel_g, y_vel_s, z_vel_s, z_vel_g, abs_v, slip_x, slip_y, slip_z, rho_g, rho_s, mu_g,
  reyp, cd, void_g, void_s, k_g_s, diam2;
  diam2 = 0.00218;
  thread_g = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, s_col);
  thread_s = THREAD_SUB_THREAD(mix_thread, f_col);
  x_vel_g = C_U(cell, thread_g);
  y_vel_g = C_V(cell, thread_g);
  x_vel_s = C_U(cell, thread_s);
  y_vel_s = C_V(cell, thread_s);
  z_vel_s = C_U(cell, thread_s);
  z_vel_g = C_V(cell, thread_g);
  slip_x = x_vel_g - x_vel_s;
  slip_y = y_vel_g - y_vel_s;
  slip_z = z_vel_g - z_vel_s;
  rho_g = C_R(cell, thread_g);
  rho_s = C_R(cell, thread_s);
  mu_g = C_MU_L(cell, thread_g);
  abs_v = sqrt(slip_x*slip_x + slip_y*slip_y + slip_z*slip_z);
  void_g = C_VOF(cell, thread_g);
  void_s = C_VOF(cell, thread_s);
  reyp = rho_g*abs_v*diam2/mu_g;
  cd=24.0/(reyp*void_g)*(1.0+0.15*pow(reyp,0.687)*pow(void_g,0.687));
  if (void_g > 0.8)
    k_g_s=3.0/4.0*cd*void_s*void_g*rho_g*abs_v*pow(void_g,-2.65)/diam2;
  else
    k_g_s = 150.0*void_s*(1.0-void_g)*mu_g/(void_g*diam2*diam2)+1.75*rho_g*void_s*abs_v/diam2;
  return k_g_s;
}
```