



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA
E RECOBRIMENTO EM LEITO DE JORRO**

CLAUDIO ROBERTO DUARTE

Uberlândia – MG
2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA E
RECOBRIMENTO EM LEITO DE JORRO**

Claudio Roberto Duarte

Orientador : Marcos Antonio de Souza Barrozo
Co-Orientadora : Valéria Viana Murata

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos necessários
a obtenção do título de Doutor em Engenharia
Química.

Uberlândia – MG
2006

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
CLAUDIO ROBERTO DUARTE, APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA, EM 28/03/2006.**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
(Orientador – PPG-EQ/ UFU)**

**Prof^a. Dr^a. Valéria Viana Murata
(Co-Orientadora – PPG-EQ/ UFU)**

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

**Prof. Dr. José Teixeira Freire
(PPG-EQ/UFSCAR)**

**Prof. Dr. César Costapinto Santana
(PPG-EQ/UNICAMP)**

Dedico esta Tese

**aos meus pais, irmãos, sobrinhos e
à minha lindinha que tanto amo.**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela saúde e pela capacidade de desenvolver este trabalho. Um agradecimento especial aos meus pais pelo incentivo, amor, carinho e palavras de conforto nestes 10 anos de ensino superior.

Agradeço a todos os meus irmãos: Pollyana, Claudia, Simone, Carlos, Elaine, João Bosco, Eleuza, Ana Lúcia, Ângela e José Urbano, pelo carinho e esforço para que eu pudesse concluir os estudos.

Agradeço a minha lindinha do coração, Márcia, por me fazer a cada dia mais feliz e por me dar tanto amor e carinho.

Ao longo de minha vida acadêmica construí várias amizades. Estas amizades são frutos de um ambiente gostoso e agradável que a FEQUI-UFU propicia aos seus alunos. Aqui conheci e fiz vários amigos para toda a minha vida, o que representa uma de minhas principais conquistas ao longo desta jornada acadêmica.

Esta tese é fruto de um esforço mútuo que exigiu muita dedicação e aplicação. Neste sentido, me considero privilegiado por ter contato com a inestimável colaboração dos pupilos: José Luiz (Sasá Mutema), Ricardinho (Paçoquinha), Michel (Chechelzinho) e Jonatas (Picolé).

Agradeço aos professores da FEQUI-UFU pelos ensinamentos e amizade, em especial aos professores Carlos Henrique Ataíde e João Jorge Ribeiro Damasceno.

Agradeço a atenção e paciência com que sempre me atenderam os técnicos administrativos: Édio, Tiago, Cleide, Silvino, José Henrique e Anísio.

Um agradecimento também especial aos meus colegas de doutorado Fábio (Piu) e Luis Gustavo, que inauguraram comigo a primeira turma de doutorado do PPGEQ-UFU. Ao longo destes anos tivemos muitas conversas agradáveis que nos renderam boas risadas, mas também avanços em nossos trabalhos.

Agradeço de forma carinhosa a Professora Valéria pela amizade, carinho, orientação e atenção. Valéria você sempre contribuiu de forma brilhante para o andamento deste trabalho.

Finalmente agradeço ao meu orientador Marquinho por ter sido a cada dia um exemplo de homem, de ser humano, de profissional e de dedicação. Com certeza você dá à palavra orientação o seu verdadeiro valor. Nestes anos em que trabalhamos juntos, vários foram os momentos em que você não foi um orientador e sim um pai. Obrigado de coração!

Agradeço à FAPEMIG pelo incentivo à pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de Figura	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vii
Resumo	xiii
Abstract	xiv

Índice

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	17
1.1 – Recobrimento de Partículas e Inoculação	17
1.1.1 – O Uso de Leito de Jorro no Recobrimento	2
1.2 – Fluidodinâmica Computacional	4
1.2.1 – Aplicações da CFD no Campo da Engenharia Química	4
1.3 – Objetivos	5
1.3.1 – Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro	5
1.3.2 – Estudo de Revestimento de Sementes de Soja em Leito de Jorro	6
CAPÍTULO II	8
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 – Leito de Jorro	8
2.1.1 – Histórico e Características	8
2.1.2 – Características Fluidodinâmicas de um Leito de Jorro	10
2.2 – Um breve histórico da Fluidodinâmica Computacional	13
2.3 – Fluidodinâmica Computacional em Sistemas Multifásicos	15
2.3.1 – Modelagem Básica Empregada em Escoamentos Multifásicos	15
2.3.1.1 – Modelagem Euler-Euler	16
2.4 – Volumes Finitos	18
2.5 – Geração de Malhas Computacionais de Discretização	20
2.5.1 – Métodos de Malha Estruturada	20
2.5.2 – Métodos de Malha Não-Estruturada	22
2.5.3 – Métodos de Malha Híbridas	23
2.6 – Métodos de Linearização e de Solução do Sistema de Equações Linearizadas utilizadas pelo FLUENT®	23
2.7 – Inoculação de Sementes de Soja	24
2.7.1 – Qualidade das Sementes de Soja	25
2.7.2 – Equipamentos Usados na Inoculação de Sementes de Soja	26
2.8 – Desenvolvimento de Um Modelo Matemático do Recobrimento Usando Balanço Populacional	30
2.8.1 – Balanço Populacional Aplicado a Processos de Revestimento de Partículas	34
2.9 – Planejamento Experimental	36
CAPÍTULO III	40

Estudo DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO JORRO: MODELAGEM , SIMULAÇÃO E verificação EXPERIMENTAL	40
3.1 – <i>Modelagem Multifásica</i>	40
3.1.1 – Modelagem Euler-Euler	40
3.1.1.1 – O Modelo de Volume de Fluidos (VOF).....	41
3.1.1.2 – O Modelo de Mistura	41
3.1.1.3 – O Modelo Euleriano	41
3.1.2 – Identificação do Modelo Multifásico Adequado ao Leito de Jorro	42
3.1.2.1 – Linhas de Direção Detalhadas	42
3.2 – <i>Etapas de Pré-Processamento</i>	44
3.3 – <i>O Modelo Euleriano Granular Multifásico Aplicado ao Leito de Jorro</i>	46
3.4 – <i>Verificação do Modelo Euleriano Granular Multifásico</i>	54
3.4.1 – Comparação com os Resultados Experimentais de HE <i>et al.</i> (1994)	54
3.4.2 – Comparação das Simulações com Resultados Experimentais Obtidos em um Leito de Jorro Bidimensional.....	59
3.4.2.1 – Descrição do Aparato Experimental	59
3.4.2.2 – Comparação entre Resultados Experimentais e Simulados.....	60
3.5 – <i>Estudo da Influência das Variáveis Operacionais e da Geometria sobre a Fluidodinâmica do Leito de Jorro</i>	63
3.5.1 – Leito de Jorro com Tubo Draft	63
3.5.2 – Leito de Jorro sem Tubo Draft	68
3.5.2.1 – Influência da Altura Estática do Leito.....	68
3.5.2.1.1 – Curva Característica do Leito de Jorro	68
3.5.2.1.2 – Sobre o Perfil de Fração de Volume de Sólidos	73
3.5.2.1.3 – Sobre a Velocidade de Jorro Mínimo	77
3.5.2.1.4 – Sobre o Perfil de Pressão	78
3.5.2.2 – Influência do Diâmetro das Partículas	82
3.5.2.2.1 – Sobre a Curva de Pressão Total <i>versus</i> Vazão de Ar de Jorro.....	82
3.5.2.2.2 – Sobre o Perfil de Fração de Volume de Sólidos	84
3.5.3 – Para o Leito Cônico Descrito por OLAZAR (2001).....	87
3.5.3.1 – Resultados para Condição 1 de Olazar.....	88
3.5.3.2 – Resultados para Condição 2 de Olazar.....	89
3.5.3.3 – Resultados para Condição 3 de Olazar.....	90
3.5.3.4 – Comparação dos Resultados Simulados e Calculados para as Condições de Olazar (2001)	91
3.6 – <i>Estudo do Formato de Jorro e do Diâmetro Médio de Jorro</i>	93
3.7 – <i>Velocidade da Partícula nas Zonas de Aceleração e Desaceleração da Região de Jorro</i>	96
CAPÍTULO IV	99
Estudos experimentais e de simulação do revestimento de soja.....	99
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS	99
4.1.1 – Revestimento de Sementes de Soja em Leito de Jorro	99
4.1.1.1 – Sementes.....	99
4.1.1.2 – Micronutrientes	100
4.1.1.3 – Inoculante	100
4.1.1.4 – Esquema da Unidade Experimental de Inoculação em Leito de Jorro....	101
4.1.1.5 – Preparo da Mistura Recobridora	102
4.1.1.6 – Operação.....	103
4.1.1.7 – Cálculo da Eficiência de Recobrimento Experimental	104

4.1.2 – Revestimento de Sementes de Soja na Máquina de Inoculação Bandeirantes	105
4.1.2.1 – Esquema da Unidade Experimental	105
4.1.2.2 – Procedimento Experimental	106
4.1.3 – Revestimento de Sementes de Soja na Máquina de Inoculação Syngenta	107
4.1.3.1 – Esquema da Unidade Experimental	107
4.1.3.2 – Procedimento Experimental	108
4.1.4 – Determinação da Massa de Revestimento das Sementes.....	108
4.1.5 – Estudo da Heterogeneidade da Distribuição de Massa de Revestimento	109
4.1.5.1 – Determinação do Índice de Dispersão.....	110
4.1.6 – Tratamento dos Dados e Condições Experimentais para o Leito de Jorro e as Máquinas Bandeirantes e Syngenta.....	111
4.1.6.1 – Índice de Dispersão para o Leito de Jorro	111
4.1.6.2 – Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes (Idm1).....	113
4.1.6.3 – Índice de Dispersão para Máquina Syngenta (Idm2).....	114
4.1.8 – O uso do Modelo de Balanço Populacional no Estudo da Cinética de Revestimento de Soja em Leito de Jorro	115
4.2 - <i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	117
4.2.1– Resultados do Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes.....	117
4.2.1.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes	117
4.2.2– Resultados do Índice de Dispersão para Máquina Syngenta	119
4.2.2.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para Máquina Syngenta..	119
4.2.3– Resultados do Índice de Dispersão para o Leito de Jorro	120
4.2.3.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para o Leito de Jorro	121
4.2.4 – Comparação entre o Índice de Dispersão para cada Equipamento.....	122
4.2.5 – Característica do Revestimento nos Diferentes Equipamentos Estudados	122
4.2.6 – Aplicação do Modelo de Balanço Populacional para o Leito de Jorro.....	123
CAPÍTULO V	126
Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	126
5.1 <i>ESTUDO DE FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO</i>	126
5.2 <i>ESTUDO DE REVESTIMENTO DE SOJA EM LEITO DE JORRO</i>	127
5.3 <i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	128
ANEXO 1.....	130
ANEXO 1.....	131
A1. Descrição do Método de Volumes Finitos.....	132
A1.2 – <i>As Quatro Regras Básicas de PATANKAR (1980) para Garantir o Realismo Físico da Solução Numérica</i>	136
ANEXO 2.....	138
A2 - Modelagem de Fluxos Multifásicos via FLUENT.....	139
A2.1 – <i>Modelagem de Fluxos Multifásicos via FLUENT</i>	139
A2.1.1 – Fluxos Multifásicos	139
A2.1.2 – Regimes de Fluxo Multifásico	139
ANEXO 3.....	141
A3 – Descrição Matemática do Problema Multifásico	142
A3.1 – <i>Método de Solução Sequencial</i>	142
A3.2 – <i>Método de Solução Simultânea</i>	143

A3.3 – Linearização: Implícita e Explícita.....	144
A3.4 – Discretização	145
A3.5 – Esquema Upwind de Primeira Ordem	147
A3.6 – Esquema Power-Law.....	147
A3.7 – Esquema Upwind de Segunda Ordem.....	148
A3.8 – O Esquema QUICK.....	149
A3.9 – Esquema de Diferenciação Central.....	150
A3.10 – Forma Linearizada da Equação Discreta	150
A3.11 – Sub-Relaxação	151
A3.12 – Discretização Temporal	151
A3.13 – Integração Implícita no Tempo.....	152
A3.14 – Integração Explícita no Tempo.....	152
A3.15 – O Resolvedor Segregado	152
A3.16 – Discretização da Equação da Continuidade	153
A3.17 – Esquema de Interpolação da Densidade.....	153
A3.18 – Acoplamento Pressão –Velocidade.....	154
A3.19 – O algoritmo SIMPLE.....	154
A3.20 – O Algoritmo SIMPLEC.....	156
A3.21 – O Algoritmo PISO	156
A3.22 – Cálculos com Dependência de Tempo e em Estado Estacionário.....	156
A3.23 – A Formulação de Fluxo Frozen.....	157
A3.24 – O Resolvedor Acoplado.....	157
ANEXO 4.....	158
A4 – Perfis de Fração de Volume de Sólidos Para as Geometrias de Olazar (2001)	159
ANEXO 5.....	164
A5 – Diâmetro Médio de Jorro	165
A5.1 – Diâmetro de Jorro para $He = 0,15\ m$	165
A5.2 – Diâmetro de Jorro para $He = 0,19\ m$	171
A5.3 – Diâmetro de Jorro para $He = 0,22\ m$	177
A5.4 – Diâmetro de Jorro para $He = 0,25\ m$	183
CAPÍTULO VI.....	189
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O leito de jorro com suas regiões características.	9
Figura 2.2 - Soluções dotadas e desprovidas de realismo físico.	19
Figura 2.3 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.	21
Figura 2.4 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetrahédricos.....	22
Figura 2.5 - Malha híbrida.....	23
Figura 2.6 - Aptidão agrícola da cultura da soja no estado mineiro	25
Figura 2.7 – Máquinas de inoculação de sementes: Bandeirantes.....	27
Figura 2.8 – Máquinas de inoculação de sementes: Syngenta	27
Figura 2.9 – Esquema geral para o recobrimento de partículas em leito de jorro.	28
Figura 2.10 – Comparação entre plantas <i>in natura</i> e recobertas	28
Figura 2.11 – Raízes de plantas de soja com inoculante (a) e sem inoculante (b)	29
Figura 2.12 – Comparação entre nódulos das plantas de sementes inoculadas e <i>in natura</i>	29
Figura 2.13 – Comparação entre a coloração de nódulos de plantas recobertas e <i>in natura</i> . ..	30
Figura 2.14 – Esquema ilustrativo dos eventos de crescimento, aparecimento e desaparecimento de partículas.	31
Figura 2.15 – Faixa e intervalos de massa de partícula.	32
Figura 3.1 – Malha refinada aplicada ao leito de jorro	45
Figura 3.2 – Geometria do leito, He <i>et al.</i> (1994).....	55
Figura 3.3 – Malha adotada para o leito (He <i>et al.</i> (1994)).....	55
Figura 3.4 – Fração de volume de sólidos simulado para as condições de He <i>et al.</i> (1994)....	56
Figura 3.5 – Distribuição de velocidade radial, das partículas resultados experimentais de HE <i>et al.</i> (1994).....	56
Figura 3.6 – Distribuição de velocidade radial, das partículas resultados obtidos por simulação.	56
Figura 3.7 – Mapa de vetor velocidade de sólidos na região cônica.	57
Figura 3.8 – Distribuição radial de porosidade (região de jorro), resultados experimentais obtidos por HE <i>et al.</i> (1994).	58
Figura 3.9 – Distribuição radial de porosidade simulada na região de jorro.....	58
Figura 3.10 – Distribuição radial de porosidade (região de anular), resultados experimentais obtidos por HE <i>et al.</i> (1994).	58
Figura 3.11 – Distribuição radial de porosidade simulada na região anular.	58
Figura 3.12 – Geometria do leito de jorro bidimensional	60
Figura 3.13 – O leito de jorro bidimensional	60
Figura 3.14 – Imagem do leito de jorro bidimensional obtida com a câmera de alta velocidade	60
Figura 3.15 – Perfil de velocidade axial da partícula na região de jorro	61
Figura 3.16 – Perfil de velocidade axial da partícula na região anular.....	61
Figura 3.17 – Perfil simulado de velocidade axial da partícula em diferentes alturas do leito	62
Figure 3.18 – Fração de volume de sólidos para o leito bidimensional com tubo draft.	62
Figura 3.19 – Porosidade no eixo central do leito em função da distância axial usado na determinação da altura da fonte para $h_d = 50\text{mm}$	65
Figura 3.20 – Valores de queda de pressão para as relações D_c/D_i e h_d estudadas.....	65
Figura 3.21 – Valores de altura da fonte para as relações D_c/D_i e h_d estudadas.....	66
Figura 3.22 – Valores de taxa de recirculação para as relações D_c/D_i e h_d estudadas.....	66
Figura 3.23 – Flutuação de Pressão Típica de um Leito de Jorro	69
Figura 3.24 – Curva característica de Jorro para $He=0,15\text{m}$	69

Figura 3.25 – Curva característica de Jorro para $He=0,19m$	70
Figura 3.26 – Curva característica de Jorro para $He=0,22m$	70
Figura 3.27 – Curva característica de Jorro para $He=0,25m$	71
Figura 3.28 – Curva de desvio padrão normalizado para $He=0,15m$	71
Figura 3.29 – Curva de desvio padrão normalizado para $He=0,19m$	72
Figura 3.30 – Curva de desvio padrão normalizado para $He = 0,22m$	72
Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25 m$	74
Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25 m$	75
Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25 m$	76
Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25 m$	77
Figura 3.32 - Perfil de pressão (Pa) para $He=0,25 m$	79
Cont. Figura 3.32 - Perfil de pressão para $He=0,25 m$	80
Cont. Figura 3.32 - Perfil de pressão para $He=0,25 m$	81
Figura 3.33 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=2mm$).....	83
Figura 3.34 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=4mm$).....	83
Figura 3.35 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=6mm$).....	84
Figura 3.36 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 2mm.	84
Cont. Figura 3.36 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 2mm.	85
Cont. Figura 3.37 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 4mm.	86
Figura 3.38 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 6mm	86
Figura 3.39 – Configuração do leito estudado por OLAZAR (2001).....	87
Figura 3.40 – Pressão total versus vazão de ar de jorro para Cond.1	89
Figura 3.41 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo... 89	
Figura 3.42 – Pressão total versus vazão de ar de jorro para Cond.2	90
Figura 3.43 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo... 90	
Figura 3.44 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo $Q_{min} (m^3/h) = 102,80$ e queda de pressão (Pa) = 2576,0	91
Figura 3.45 – Principais formatos de jorro segundo MATHUR e EPSTEIN (1974).....	93
Figura 3.46 – Formatos de jorro obtidos na simulação com CFD.....	94
Figura 3.47 – Esquema para regiões de aceleração das partículas em um Leito de Jorro.	96
Figura 3.48 – Perfil longitudinal de velocidade de partícula.	97
Figura 4.1 – Produto comercial utilizado como fonte de micronutrientes Mo e Co.	100
Figura 4.2 – Produto comercial utilizado como fonte de Inoculante.....	101
Figura 4.3 – Esquema da unidade experimental com a atomização para o revestimento de sementes de soja.....	102
Figura 4.4 – Mistura recobridora.	103
Figura 4.5 – Bico atomizador de duplo fluido.....	103
Figura 4.6 – Máquinas de inoculação Bandeirantes	106
Figura 4.7 – Máquinas de inoculação Syngenta.	107
Figura 4.8 – Massa de recobrimento versus massa semente <i>in natura</i> correspondente.....	109
Figura 4.9 – Gráfico típico de uma distribuição de massa de revestimento.....	110
Figura 4.10 – Superfície resposta para o índice de dispersão	118
para máquina Bandeirantes com $x_2= 0$	118
Figura 4.11 – Superfície resposta para o índice de dispersão para máquina Syngenta.	120
Figura 4.12 – Superfície de resposta para o índice de dispersão para o leito de jorro com $x_2= 0$	121 121

Figura 4.13 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 1)	124
Figura 4.14 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 2)	124
Figura 4.15 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 3)	124
Figura 4.16 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 4)	124
Figura 4.17 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 5)	124
Figura 4.18 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 6)	124
Figura 4.19 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 7)	125
Figura 4.20 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 8)	125
Figura 4.21 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 9)	125
Figura 4.22 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 10)	125
Figura A1.1- Balanço de fluxos em um Volume de Controle	132
Figura A1.2 – Representação de um Volume de Controle Finito genérico em 2D.....	134
(Fonte: BARREIRA, 2003 – (Patankar 1980))	134
Figura A2.1 – Regimes de Fluxo Multifásico	140
Figura A3.1 - Algoritmo do Método de Solução Segregada.....	142
Figura A3.2 - Algoritmo do Método de Solução Segregada.....	143
Figura A3.3 - Volume de controle usado para ilustrar a discretização	147
da Equação de Transporte de um escalar.	147
Figura A3.4 - Variação de uma Variável ϕ entre $x=0$ e $x=L$	148
Figura A3.5 - Volume de controle Unidimensional	149
Figura A4.1 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.1.....	159
Cont. Figura A4.1 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.1.....	160
Figura A4.2 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.2.....	161
Cont. Figura A4.2 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.2.....	162
Figura A4.4 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.3.....	163
Figura A5.1.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,028$ Kg/s.....	165
Figura A5.1.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,031$ Kg/s.....	166
Figura A5.1.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,034$ Kg/s.....	167
Figura A5.1.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,037$ Kg/s.....	168
Figura A5.1.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,040$ Kg/s.....	169
Figura A5.1.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	170
Figura A5.2.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,037$ Kg/s.....	171
Figura A5.2.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,040$ Kg/s.....	172
Figura A5.2.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,044$ Kg/s.....	173
Figura A5.2.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	174
Figura A5.2.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	175
Figura A5.2.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	176
Figura A5.3.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	177
Figura A5.3.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	178
Figura A5.3.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	179
Figura A5.3.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,056$ Kg/s.....	180
Figura A5.3.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,059$ Kg/s.....	181

Figura A5.3.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,062$ Kg/s.....	182
Figura A5.4.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	183
Figura A5.4.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	184
Figura A5.4.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,056$ Kg/s.....	185
Figura A5.4.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,059$ Kg/s.....	186
Figura A5.4.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,062$ Kg/s.....	187
Figura A5.4.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,065$ Kg/s.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Relações constitutivas.....	17
Tabela 2.2 – Matriz do planejamento composto central.	38
Tabela 3.1- Condições experimentais usadas por He <i>et al.</i> (1994)	55
Tabela 3.2: Condições e geometrias adotadas no planejamento	63
Tabela 3.3: Resultados de Queda de Pressão (QP) obtidos na simulação.	64
Tabela 3.4: Resultados da regressão para a Queda de Pressão.....	64
Tabela 3.5: Condições e geometrias adotadas no planejamento	68
Tabela 3.6 – Comparação entre os valores de Q_{jmin} simulados, calculados e experimentais. ..	78
Tabela 3.7: Condições e geometrias adotadas no estudo da influência do diâmetro da partícula da fluidodinâmica do leito de jorro	82
Tabela 3.8 – Condições estudadas por OLAZAR (2001)	88
Tabela 3.9 – Comparação entre a simulação via CFD e as equações de OLAZAR (2001) para a velocidade de jorro mínimo.	91
Tabela 3.10 – Comparação entre a simulação via CFD e as equações de OLAZAR (2001) para a queda de pressão de jorro mínimo.....	92
Tabela 3.11– Comparação entre valores simulados e experimentais de V_{min} para Cond. 3	92
Tabela 3.12– Comparação entre valores simulados e experimentais de ΔP_{smin} para Cond. 3.	92
Tabela 3.13 - Geometrias usadas na simulação dos itens a, b, c e d da Figura 3.46	94
Tabela 3.14 - Valores de diâmetro médio de jorro simulados (CFD) e calculados por.....	95
correlações da literatura para diferentes alturas de leito estático	95
Tabela 3.15: Condições e geometrias adotadas por MATHUR e EPSTEIN (1974)	97
Tabela 4.1 – Propriedades físicas das sementes de soja variedade VENCEDORA.....	100
Tabela 4.2 – Matriz do planejamento de um pcc para três variáveis.....	112
Tabela 4.3 – Níveis utilizados no planejamento experimental da Máquina Bandeirantes.....	113
Tabela 4.4 – Matriz do planejamento experimental (forma codificada) Máquina Syngenta.	114
Tabela 4.5 – Matriz do planejamento experimental Máquina Bandeirantes	117
Tabela 4.6 – Resultados da regressão para os índices de dispersão.	118
Tabela 4.7 – Resultados do Índice de dispersão para a Máquina Syngenta.....	119
(Kg soja/min)	119
Tabela 4.8 – Resultados da regressão para os índices de germinação.	119
Tabela 4.9 – Matriz do planejamento de um pcc para três variáveis.....	120
Tabela 4.10– Resultados da regressão para os índices de dispersão do leito de jorro.....	121
Tabela 4.11 – Índice de Dispersão para os três equipamentos estudados.....	122
Tabela 4.12 – Matriz do planejamento de um pcc para duas variáveis.	123
Tabela A5.1 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,028$ Kg/s.....	165
Tabela A5.2 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,031$ Kg/s.....	166
Tabela A5.3 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,034$ Kg/s.....	167
Tabela A5.4 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,037$ Kg/s.....	168
Tabela A5.6 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	170
Tabela A5.7 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,037$ Kg/s.....	171
Tabela A5.8– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,040$ Kg/s.....	172
Tabela A5.9– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,044$ Kg/s.....	173
Tabela A5.10– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	174

Tabela A5.11– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	175
Tabela A5.12 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	176
Tabela A5.13 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047$ Kg/s.....	177
Tabela A5.14 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	178
Tabela A5.15 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	179
Tabela A5.16 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,056$ Kg/s.....	180
Tabela A5.17 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,059$ Kg/s.....	181
Tabela A5.18 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,062$ Kg/s.....	182
Tabela A5.19 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s.....	183
Tabela A5.20 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053$ Kg/s.....	184
Tabela A5.21 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,056$ Kg/s.....	185
Tabela A5.22 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,059$ Kg/s.....	186
Tabela A5.24 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,065$ Kg/s.....	188

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração, $M^0 L^1 T^{-2}$
a_E	Coeficiente da variável ϕ no ponto nodal E
a_g	Taxa de aglomeração
a_N	Coeficiente da variável ϕ no ponto nodal N
a_P	Coeficiente da variável ϕ no ponto nodal P
a_S	Coeficiente da variável ϕ no ponto nodal S
a_W	Coeficiente da variável ϕ no ponto nodal W
A	Área, $M^0 L^2 T^0$
A_1	Parâmetro da Equação (3.32)
b	Taxa de fluxo
B	Taxa de aparecimento de novas partículas em uma faixa de propriedade de estado
B_1	Parâmetro da Equação (3.32)
C_a	carregamento de partículas, $M^0 L^0 T^0$
C_D	Coeficiente de arraste
C_s	Concentração total de sólidos na suspensão recobridora, $M^0 L^{-3} T^0$
d	Diâmetro da partícula, $M^0 L^1 T^0$
$\bar{d}_p$	Diâmetro médio da esfera de igual volume que a partícula, $M^0 L^1 T^0$
D	Taxa de desaparecimento de novas partículas em uma faixa de propriedade de estado
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica, $M^0 L^1 T^0$
D_i	Diâmetro da entrada do leito, $M^0 L^1 T^0$
D_s	Diâmetro médio de jorro, $M^0 L^1 T^0$
e_{ss}	Coeficiente de restituição
$f(L)$	Função densidade normalizada, $M^0 L^0 T^0$
$f(m)$	Função densidade normalizada, $M^0 L^0 T^0$
f_r	taxa de fragmentação
$f(v,t)$	Função densidade normalizada, $M^0 L^0 T^0$
$f(\alpha_i)$	Função densidade normalizada, $M^0 L^0 T^0$
F	Estatística F de Fisher, $M^0 L^0 T^0$
F	Parâmetro da discretização espacial
$\vec{F}$	Força externa do corpo, $M^1 L^1 T^{-2}$
F_C	Estatística F de Fisher calculado, $M^0 L^0 T^0$

F_I	Percentagens de sementes sem fissuras “in-natura”
$\vec{F}_{\text{lift}}$	Força de ascensão, $M^1 L^1 T^{-2}$
F_R	Percentagens de sementes sem fissuras recobertas
$\vec{F}_{vm}$	Força mássica virtual, $M^1 L^1 T^{-2}$
g	Aceleração gravitacional, $M^0 L^1 T^{-2}$
g_0	Função distribuição radial
G	Taxa de crescimento por camada, $M^1 L^0 T^{-1}$
h	Entalpia específica
h_d	Distância do tubo Draft a base do leito, $M^0 L^1 T^0$
H_0	Hipótese de nulidade do teste F de Fisher, $M^0 L^0 T^0$
H_1	Hipótese afirmativa do teste F de Fisher, $M^0 L^0 T^0$
He	Altura do leito estático, $M^0 L^1 T^0$
i_c	Idade da célula, $M^0 L^0 T^1$
i_d	Idade do elemento de fluido, $M^0 L^0 T^1$
$Idm1$	Índice de dispersão para máquina Bandeirantes, $M^0 L^0 T^0$
$Idm2$	Índice de dispersão para máquina Syngenta, $M^0 L^0 T^0$
Id_j	Índice de dispersão para o leito de jorro, $M^0 L^0 T^0$
I_F	Índice de Sementes sem Fissuras
J	Fluxo de uma propriedade através de uma seção
k	Número de variáveis de um planejamento
K	Coeficiente de troca de momento na interface
L	Comprimento, $M^0 L^1 T^0$
m	Massa de semente de soja, $M^1 L^0 T^0$
$\dot{m}$	Taxa de transferência de massa
m_i	Menor massa de semente de soja no intervalo i de referência, $M^1 L^0 T^0$
$\overline{m_i}$	Massa média de semente de soja no intervalo i de referência, $M^1 L^0 T^0$
m_{max}	Maior valor de massa de semente, $M^1 L^0 T^0$
m_{min}	Menor valor de massa de semente, $M^1 L^0 T^0$
m_{rec}	Massa de recobrimento, $M^1 L^0 T^0$

m_s	Massa das sementes secas, $M^1L^0T^0$
N	Número total de sementes de soja, $M^0L^0T^0$
n_r	Números de ensaios nos níveis centrais, $M^0L^0T^0$
p	Pressão, $M^1L^{-1}T^{-2}$
pcc	Planejamento composto central, $M^0L^0T^0$
Pe	Número de Peclet, $M^0L^0T^0$
p_s	Pressão de sólido
$\bar{q}$	Fluxo de calor
Q	Vazão volumétrica, $M^0L^3T^{-1}$
Q_g	Vazão mássica de ar, $M^1L^0T^{-1}$
$\bar{Q}$	Intensidade da troca de calor entre as fases
QME	Quadrado médio da equação ajustada, $M^0L^0T^0$
QMR	Quadrado médio dos resíduos, $M^0L^0T^0$
QP	Queda de Pressão, $M^1L^{-1}T^{-2}$
r	Raio, $M^0L^1T^0$
r_{di}	Taxa de diluição
R	Região onde a entidade ψ é válida, $M^0L^3T^0$
R^2	Coeficiente de correlação para o ajuste das equações empíricas, $M^0L^0T^0$
$\bar{R}$	Força de interação entre as fases
Re	Número de Reynolds
Re_s	Número de Reynolds relativo (Adota-se Velocidade relativa em seu cálculo)
St	Número de Stokes, $M^0L^0T^0$
S_ϕ	Termo de geração da propriedade ϕ da equação de conservação
t	Tempo, $M^0L^0T^1$
t	Estatística t de Student, $M^0L^0T^0$
t_p	Tempo de relaxação, $M^0L^0T^1$
t_s	Tempo de resposta do sistema, $M^0L^0T^1$
T_{Aj}	Temperatura do ar de jorro na entrada do leito
T_d	Tempo de resposta da partícula, $M^0L^0T^1$
u	Velocidade, $M^0L^1T^{-1}$
U_{ms}	Velocidade de jorro mínimo, $M^0L^1T^{-1}$
v	Velocidade, $M^0L^1T^{-1}$

V_g	Volume do grânulo, , $M^0L^3T^0$
V	Volume, $M^0L^3T^0$
$V1$	Relação Dc/Di , $M^0L^0T^0$
$V2$	Distância do tubo Draft a base do leito, $M^0L^1T^0$
V_{AJ}	Vazão de ar de jorro, $M^0L^3T^{-1}$
V_{AT}	Vazão de ar de atomização, $M^0L^3T^{-1}$
V_i	Taxa de mudança da propriedade ξ , no caso desta ser massa, $M^1L^0T^{-1}$
V_I	Percentagens de germinação de sementes “in-natura”
V_R	Percentagens de germinação de sementes recobertas
V_{SP}	Vazão de suspensão, $M^0L^3T^{-1}$
V_x	Velocidade na direção X, $M^0L^1T^{-1}$
V_y	Velocidade na direção Y, $M^0L^1T^{-1}$
V_z	Velocidade na direção Z, $M^0L^1T^{-1}$
V_{arcod}	Variável da equação de codificação em uma matriz de planejamento
$x,y \text{ e } z$	Coordenadas espaciais, $M^0L^1T^0$
x_1	Relação Dc/Di codificada, $M^0L^0T^0$
x_2	Distância do tubo Draft a base do leito codificada, $M^0L^0T^0$
X_1	Vazão de ar de jorro codificada, $M^0L^0T^0$
X_2	Vazão de ar de atomização codificada, $M^0L^0T^0$
X_3	Vazão de suspensão recobridora codificada, $M^0L^0T^0$
Xq_1	Variável qualitativa tubo draft, $M^0L^0T^0$
Xq_2	Variável qualitativa posição do bico, $M^0L^0T^0$
Xq_3	Variável qualitativa tamanho de semente(“tipo de peneira”), $M^0L^0T^0$
Y	Termo dependente da equação (2.11)
Y_i	Variável resposta de uma matriz de planejamento
$Y1m1$	Índice de germinação para máquina Bandeirantes

$Y2m1$	Índice de vigor para máquina Bandeirantes
$Y3m1$	Índice de sementes não fissuradas para máquina Bandeirantes
$Y1m2$	Índice de germinação para máquina Syngenta
$Y2m2$	Índice de vigor para máquina Syngenta
$Y3m2$	Índice de sementes não fissuradas para máquina Syngenta
$w(t, i_c)$	Função distribuição de idade em um reator

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica, $M^0L^0T^1$
α_c	Fração volumétrica da fase continua, $M^0L^0T^1$
α_d	Fração volumétrica da fase dispersa, $M^0L^0T^1$
α_{el}	Parâmetro da Equação (3.21) com I=1..3.
α_o	Ponto adicional do planejamento composto central (ortogonal)
α_1	Fator de sub-relaxação para a pressão
α_p	Fração volumétrica da fase sólida, $M^0L^0T^0$
α_q	Fração volumétrica da fase fluida, $M^0L^0T^0$
C_a	“Carregamento de partículas”, $M^0L^0T^0$
β^o	Ângulo interno de atrito
β_0	Termo independente da Equação (2.11)
β_i	Termo independente da Equação (2.11)
β_{ij}	Termo independente da Equação (2.11)
χ_1	Variável codificada da vazão de sementes de soja
χ_2	Variável codificada da vazão de suspensão
δ	Distância entre dois pontos nodais, $M^0L^1T^0$
ε	Porosidade
ϕ	Esfericidade
ϕ	Propriedade da lei de conservação na forma geral
γ	Razão de densidade de material, $M^0L^0T^0$
γ_{ts}	Energia de dissipação devido à colisão
η	Rendimento preditivo do processo de recobrimento

λ	Viscosidade bulk, $M^1L^{-1}T^{-1}$
μ	Viscosidade da fase fluida, $M^1L^{-1}T^{-1}$
μ_s	Viscosidade de cisalhamento, $M^1L^{-1}T^{-1}$
$\mu_{s,col}$	Viscosidade devido a colisão das partículas, $M^1L^{-1}T^{-1}$
$\mu_{s,fr}$	Viscosidade devido ao atrito, $M^1L^{-1}T^{-1}$
$\mu_{s,kin}$	Viscosidade cinética, $M^1L^{-1}T^{-1}$
θ	Ângulo da parte cônica
Θ_s	Temperatura granular
ρ	Densidade da fase fluida, $M^1L^{-3}T^0$
ρ_b	Densidade Bulk, $M^1L^{-3}T^0$
ρ_c	Densidade da fase continua, $M^1L^{-3}T^0$
ρ_d	Densidade da fase dispersa, $M^1L^{-3}T^0$
ρ_s	Densidade da partícula, $M^1L^{-3}T^0$
τ_s	Tempo de relaxação da partícula, $M^0L^0T^1$
τ_q	Tensor tensão de sólidos;
ξ	Propriedade de estado qualquer
ζ_0	Valor original da variável no nível central
ζ_1	Valor original da variável referente ao nível 1
ζ_2	Valor original da variável referente ao nível -1

Subscrito

p	Fase (sólida) do modelo multifásico
q	Fase (fluida) do modelo multifásico
viz	Vizinho ou vizinhança

RESUMO

O leito de jorro tem sido usado, dentre outras aplicações, na secagem, granulação, polimerização catalítica, tratamento de resíduos e no revestimento de vários materiais. A justificativa desta aplicação é atribuída ao excelente contato fluido-partícula e às características de circulação dos sólidos. Apesar de sua extenso potencial de aplicação este equipamento, o mesmo possui algumas limitações, sendo portanto, necessário um melhor entendimento a cerca de seu comportamento fluidodinâmico. A literatura reporta vários estudos sobre a fluidodinâmica do leito de jorro, porém em geral, os trabalhos apresentam modelos matemáticos restritos a regiões específicas do leito e limitados à certas condições operacionais. Uma alternativa de estudo que tende a contornar este problema é a adoção de um modelo matemático multifásico que trate as fases como interpenetradamente contínuas e considere o balanço de momentum e massa para as fases envolvidas. O perfil fluidodinâmico característico do leito de jorro foi obtido neste trabalho através da técnica de fluidodinâmica computacional utilizando um modelo Euleriano granular multifásico. Os perfis fluidodinâmicos da partícula e do fluido, para diferentes configurações de leito e partículas, foram numericamente simulados e validados com dados experimentais. O modelo multifásico adotado, quando comparado com dados experimentais mostrou uma boa concordância para previsão de velocidade de partícula, velocidade do gás e velocidade de mínimo jorro. Através das simulações numéricas foi possível obter a curva característica de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro. O leito de jorro com tubo draft foi simulado com diferentes configurações e foi possível identificar uma configuração adequada para o revestimento de sementes de soja.

O revestimento de sementes de soja com bactérias e com micronutrientes favorece o crescimento vigoroso da planta, podendo dispensar o uso de fertilizantes amoniacais. O processo de inoculação consiste em adicionar às sementes de soja bactérias (*bradyrhizobium*) capazes de suprir a necessidade de nitrogênio dessa cultura. Neste trabalho, foi feita uma comparação da heterogeneidade do revestimento das sementes de soja promovido em leito de jorro e em máquinas tradicionalmente usadas no campo. A heterogeneidade foi medida através do índice de dispersão e o leito de jorro apresentou um revestimento mais homogêneo quando comparado com as máquinas aqui estudadas. A espessura ótima da camada de revestimento deve permitir as trocas gasosas fundamentais para a germinação e as condições ideais para a atividade das bactérias. Neste sentido, o conhecimento da cinética de crescimento da camada de revestimento é uma informação fundamental na inoculação de sementes de soja. Assim, neste trabalho foi feita a simulação numérica da variação temporal da distribuição de massa de sementes de soja revestidas em leito de jorro, utilizando um modelo de balanço populacional implementado em Maple V® Release 4. A validação do modelo foi feita através de dez experimentos de revestimentos de sementes de soja com inoculantes e micronutrientes, conduzidos em leito de jorro com spray no topo.

Palavras chave: modelagem multifásica, fluidodinâmica do leito de jorro, modelo de balanço populacional, inoculação, leito de jorro, recobrimento, soja.

ABSTRACT

The spouted bed technique has found application in many industrial processes such as drying of granular materials, blending of polymer chips, coating of tablets, and granulation of fertilizers and other materials. Although has an extensive application, the mechanisms of solids movement in spouted beds are still not completely understood. The knowledge of the solids flow pattern in spouted beds is of great interest in their design because the particle trajectories must meet the requirements of the process being carried out. The literature shows several studies on the fluid-dynamic of the spouted bed, however in general, the works present restricted models to specific regions of the bed and limited to operational conditions. There are a restrict number of works related to the fluid dynamic study of the spouted bed using a model Eulerian Multiphase. In this work, the Eulerian multiphase model, which treats gas and particle as interpenetrating continuum was used to different spouted bed configurations. The characteristic fluid-dynamic profiles of the spouted bed was obtained in this work. The technique of computational fluid-dynamic was used and the granular Eulerian model was adopted. The fluid-dynamic profiles of the particle and fluid, for different configurations of the bed were simulated and validated with experimental data. In this work the particle velocity, minimum spouting flow rate and characteristic fluid-dynamic curves of the spouted bed obtained with simulations shows a good agreement with experimental data. The spouted bed with a “draft” tube was simulated with different configurations and was possible identified the adequate configurations to recovering soybean seed.

The covering of soybean seeds with bacteria and micronutrients enhances vigorous growth of the plant thereby avoiding use of ammoniacal fertilizers. In the spouted bed covering can be done by pulverization of the coater slurry on the soybean seeds using a pneumatic atomizer. In this work, was compared the coating heterogeneity of particle recovering in spouted bed and others equipments useds in the farm. The heterogeneity was measured with the dispersion indice and the spouted bed shows a coating more homogeneous than other equipments studied. The optimum thickness of the cover allows the fundamental gaseous interchanges for germination and provides the ideal conditions for bacterium activity. A simulation of the mass distribution of seeds was obtained using a population balance model. The validation of population balance model was obtained using ten experiments of coating of soybean seeds in spouted bed.

Key words: multiphase modeling, spouted bed fluid-dynamic, computational fluid dynamics, population balance model, inoculation, spouted bed, coating, soybean seed.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – Recobrimento de Partículas e Inoculação

O recobrimento de partículas possui diversas aplicações nas indústrias químicas, farmacêuticas, de alimentos e de produtos agrícolas. O objetivo é aplicar uma camada uniforme de um material sobre a superfície de uma partícula com diversas finalidades (PICOLLO *et al.*, 1997).

Os principais objetivos do revestimento de partículas são:

- a) baixar a taxa de dissolução de substâncias químicas;
- b) tornar o manuseio de produtos mais fácil;
- c) inibir sabores e odores desagradáveis;
- d) aumentar o volume para melhor manuseio;
- e) adicionar material para suprir futura carência pela partícula;
- f) proporcionar boa estética ao produto;
- g) proporcionar resistência mecânica.

Tendo em vista os objetivos supra-citados, o revestimento de partículas apresenta inúmeras aplicações, estendendo-se a vários setores:

- a) recobrimento de grânulos de fertilizantes com enxofre (WEISS e MEISEN, 1983);
- b) recobrimento de microesferas de combustível nuclear (PICCININI e ROVERO, 1983).
- c) recobrimento de sementes com fertilizantes (LIU e LISTER, 1993);
- d) recobrimento de comprimidos (PICOLLO *et al.*, 1997);
- e) recobrimento de sementes de soja com micronutrientes e inoculante (LUCAS, 2000 e DUARTE, 2002);

No revestimento de sementes em geral tem-se como objetivo aderir macronutrientes, micronutrientes, inoculantes (bactérias), fertilizantes, fungicidas à superfície ou modificar individualmente o formato e o tamanho das mesmas com um material inerte.

Considerando a aplicação do recobrimento de sementes de produtos agrícolas, as características e propriedades das sementes de soja e do material para recobrimento habilitam o uso do leito de jorro para o revestimento por película com micronutrientes e inoculante. As

vantagens do recobrimento de sementes de soja com micronutrientes e inoculante em leito de jorro são:

- a) dosagem racional de micronutrientes;
- b) diminuição da lixiviação dos micronutrientes;
- c) diminuição de combustível e de mão-de-obra;
- d) redução do uso de fertilizantes a base de nitrogênio.

O recobrimento das sementes com inoculantes é relevante pois as bactérias do tipo *Bradyrhizobium*, que são adicionadas na suspensão recobridora, aderem-se às raízes da planta em nódulos e suprem a necessidade de nitrogênio da planta, dispensando o uso de fertilizantes amoniacais destinados a esse fim.

O uso intensivo do solo com a cultura da soja e a falta de manejo adequado têm provocado reduções dos teores de matéria orgânica e aumentado a acidez destes solos. Como consequência, a ocorrência de deficiência de alguns micronutrientes, essenciais à cultura da soja e especialmente ao processo de fixação simbiótico envolvido na atividade de bactérias do tipo *Bradyrhizobium*, utilizadas na inoculação das sementes, têm acontecido com frequência em várias regiões do Brasil. Respostas significativas na eficiência da bactéria têm sido verificadas com a aplicação de micronutrientes, especialmente molibdênio e cobalto. Os micronutrientes beneficiam a bactéria *Bradyrhizobium*, favorecendo ainda mais a nodulação das raízes, resultando em uma maior fixação de nitrogênio.

1.1.1 – O Uso de Leito de Jorro no Recobrimento

Atualmente, o revestimento de sementes no campo pode ser feito por equipamentos como o tambor giratório e máquinas de tratamento de sementes com alimentação contínua como é o caso das Máquinas Bandeirantes e Syngenta que serão apresentadas mais adiante. Estas máquinas são compostas basicamente por um sistema de alimentação de rosca sem fim e dois ou três compartimentos onde são adicionados o material recobridor que é depositado em regiões específicas da rosca.

O leito de jorro é um equipamento que devido à boa movimentação das partículas e ao ótimo contato fluido-partículas, tem sido tema de diversos trabalhos de recobrimento de partículas. Entretanto, o uso desse equipamento para revestir sementes de produtos agrícolas é um assunto ainda pouco estudado, havendo um número reduzido de trabalhos sobre o tema.

No leito de jorro, o revestimento é feito pela pulverização da suspensão recobridora sobre as sementes utilizando um bico atomizador pneumático. Neste caso o revestimento é caracterizado pelo crescimento que ocorre em torno da semente, na qual partículas do material pulverizado colidem e aderem-se à superfície formando camadas concêntricas. Este mecanismo é denominado formação de camadas.

Um trabalho pioneiro neste tema foi realizado por LIU e LISTER (1993). Neste trabalho sementes pequenas, como de mostarda e de nabo foram recobertas com dois tipos de fertilizantes em leito de jorro. Os autores estudaram o efeito das propriedades das sementes e do material recobridor e de outras variáveis operacionais na taxa de revestimento e na elutriação. CONCEIÇÃO FILHO (1997) estudou os efeitos da temperatura e da vazão do ar de jorro na eficiência do processo e no índice de germinação das sementes de soja recobertas com macronutrientes (MAP e KCl).

Quando se estuda o revestimento de sementes, é necessário que se faça uma análise criteriosa da qualidade do produto final, pois, não se justificaria recobrir a semente com nutrientes e ao mesmo tempo danificá-la. Os danos causados às sementes podem ser produzidos pela temperatura do ar ou pelos choques entre elas dentro do leito. A temperatura de operação também pode afetar a qualidade do inoculante. Nesse caso, a temperatura passa a ser o fator limitante para a sobrevivência das bactérias fixadoras de nitrogênio, já que estas são sensíveis a altas temperaturas. A qualidade das sementes recobertas pode ser avaliada pelos índices de germinação, vigor e sementes não fissuradas, bem como pelo aparecimento, pela quantidade e qualidade dos nódulos nas raízes da planta de soja. LUCAS (2000) revestindo sementes de soja com micronutrientes e inoculante, estudou o efeito das variáveis vazões de ar de jorro, de ar de atomização e de suspensão na qualidade final das sementes e na eficiência do processo. O autor obteve correlações envolvendo algumas destas variáveis para determinar as melhores condições que assegurem uma boa qualidade final das sementes.

DUARTE (2002) analisou a distribuição de massa de revestimento de sementes de soja inoculadas em leito de jorro por meio de um estudo experimental e de simulação. Neste trabalho foi adotado o índice de dispersão como forma de quantificar a heterogeneidade da distribuição de revestimento. Esta heterogeneidade foi notada após ter sido feita a pesagem de sementes com e sem o revestimento, sendo observada uma tendência de aumento da massa de recobrimento com o aumento da massa de semente “*in natura*”.

O estudo de revestimento de sementes de soja em leito de jorro foi realizado com base nas informações sobre a fluidodinâmica do escoamento no leito e conseqüentemente nas configurações mais adequadas. A configuração adotada foi fundamentada nos resultados de

um estudo de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro com sementes de soja em diferentes condições. Na sequência é abordado um tópico sobre fluidodinâmica computacional (CFD), ferramenta usada neste trabalho para avaliar a fluidodinâmica do leito de jorro.

1.2 – Fluidodinâmica Computacional

Uma etapa de fundamental importância para completo entendimento do processo de revestimento em leito de jorro, bem como de outros processos como a secagem, por exemplo, é o estudo da fluidodinâmica do fluido e das partículas no interior do leito. Este estudo pode ser desenvolvido com o uso da técnica da fluidodinâmica computacional (CFD) para problemas multifásicos, um importante segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que surgiu com o desenvolvimento tecnológico dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica. Neste segmento, encontram-se algumas das mais importantes aplicações da análise numérica computacional, como por exemplo as simulações de escoamentos em torno de perfis aerodinâmicos, com reações químicas, de sistemas multifásicos, dentre outras.

Atualmente existe uma grande quantidade de eficientes métodos numéricos, que são empregados dependendo da necessidade e viabilidade, para solução dos mais diversos problemas envolvendo fluidodinâmica. A contribuição dos pesquisadores nesta área tem sido ampla e diversa. Em engenharia química a aplicação desta ferramenta mostra-se bastante promissora e abrange diferentes segmentos, podendo ser adotada em sistemas multifásicos com ou sem reação, como é abordado no tópico a seguir.

1.2.1 – Aplicações da CFD no Campo da Engenharia Química

A Fluidodinâmica Computacional envolve a solução numérica das equações de conservação (massa, momento, energia e etc). A sua aplicação no campo da Engenharia Química é extensa, podendo-se destacar estudos como: modelagem de reatores de tanque agitado e tanques de mistura, modelagem de escoamentos multifásicos como colunas de bolhas, reatores com partículas de catalisadores e leitos fluidizados.

Na modelagem de reatores químicos, a técnica de CFD pode melhorar a descrição do escoamento, que à luz da engenharia das reações químicas geralmente é tratado empregando uma combinação de modelos altamente idealizados (PFR e CSTR) (HARRIS *et al.*, 1996). Na

maioria dos casos, uma otimização do campo de escoamento pode resultar num aumento de 1% ou 2% na seletividade, que pode representar um enorme aumento na lucratividade devido à escala de produção industrial.

O estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro utilizando a técnica de CFD, permite descrever a distribuição de velocidade das partículas e do fluido, perfil de porosidade do leito e queda de pressão desde o instante onde se inicia o movimento até o momento em que este se estabiliza. Considerando a verificação das simulações através de dados experimentais, o uso dessa técnica pode contribuir significativamente para o entendimento dos fenômenos envolvidos no escoamento do fluido e da partícula nesse equipamento e conseqüentemente auxiliar na sua melhor operação em diversos processos, como é o caso do recobrimento de partículas.

1.3 – Objetivos

Tendo em vista os aspectos mencionados anteriormente, os objetivos dessa tese são realizar um estudo fluidodinâmico em leito de jorro por meio da técnica da fluidodinâmica computacional, verificar as simulações realizadas através de dados experimentais, utilizar o leito de jorro como inoculador de sementes de soja comparando o seu desempenho com algumas máquinas convencionais e prever a cinética de recobrimento em leito de jorro através de simulações por balanço populacional. Sendo assim, o desenvolvimento desta tese contempla dois estágios, sendo o primeiro referente ao estudo da fluidodinâmica do leito de jorro e o segundo ao estudo de revestimento de sementes de soja em leito de jorro. A seguir são apresentados maiores detalhes sobre o estudo desenvolvido para alcançar os objetivos aqui propostos.

1.3.1 – Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro

Este estágio contempla um estudo sobre a fluidodinâmica em leito de jorro, por meio de CFD, utilizando o software de fluidodinâmica computacional FLUENT[®]-6.1-18.

As etapas que compõem o estudo de CFD em leito de jorro foram:

1. Obtenção do modelo matemático que represente adequadamente a fluidodinâmica do leito de jorro. Nesta etapa foram utilizadas as condições de He *et al.* (1994) para a verificação do modelo;

2. Identificação das condições de mínimo jorro (vazão de ar de jorro e queda de pressão);
3. Obtenção da curva característica de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro;
4. Identificação de uma condição adequada para o revestimento de sementes de soja no estudo experimental de inoculação;
5. Outros estudos de simulação numérica sobre a fluidodinâmica de um leito de jorro.

Cabe ressaltar, que os itens 1 a 4 listados acima foram confrontados com valores experimentais.

1.3.2 – Estudo de Revestimento de Sementes de Soja em Leito de Jorro

Vários estudos sobre revestimento de soja em leito de jorro já foram desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, onde bons resultados em termos da qualidade final da semente e do revestimento foram obtidos. Porém, a viabilidade da utilização deste equipamento na inoculação de sementes requer estudos adicionais, dentre estes a comparação com equipamentos utilizados no campo ou máquinas de inoculação, neste caso as máquinas Bandeirantes e Syngenta, ambas com sistema de rosca sem fim para transporte das sementes. Estas máquinas foram escolhidas com base em informações de produtores de soja da região do triângulo mineiro, sendo estas as mais empregadas no revestimento de soja.

Neste contexto, esta etapa do trabalho teve como objetivo a comparação do desempenho na inoculação de sementes de soja em leito de jorro com outros equipamentos comerciais de inoculação no que se refere a heterogeneidade do revestimento.

Os estudos experimentais referentes a inoculação de sementes de soja em leito de jorro e nas máquinas Bandeirantes e Syngenta foram:

1. Comparação entre a heterogeneidade da camada de revestimento de sementes recobertas em leito de jorro e aquelas revestidas nas máquinas Bandeirantes e Syngenta. A heterogeneidade foi mensurada com base no conceito de índice de dispersão, desenvolvido por DUARTE (2002);
2. Estudo da cinética de crescimento da camada de revestimento de sementes de soja em leito de jorro utilizando um modelo de balanço populacional.

O trabalho experimental foi realizado tendo em vista uma pré-verificação dos modelos utilizados nos estudos de simulação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Leito de Jorro

2.1.1 – Histórico e Características

Os sistemas gás-sólidos mais comuns podem ser classificados como não agitados, agitados mecanicamente e agitados por gás.

Os leitos fixos (não agitados) são aplicáveis a processos que não pedem alta taxa de transferência de calor e massa entre o gás e os sólidos, e nos quais a uniformidade de condições em partes diferentes do leito não é tão desejável. Em um leito fixo, não podem ser adicionados sólidos continuamente nem podem ser retirados (ou pelo menos não é desejável) e o tratamento do gás normalmente é o objetivo principal. Por exemplo, a recuperação de vapores solventes por adsorção e reações catalíticas com um catalisador de vida longa. Sua aplicação se estende então ao tratamento de sólidos e processos de calcinação, secagem dentre outros.

Uma agitação limitada pode ser dada aos sólidos por meios mecânicos pelo uso de agitadores internos. Em qualquer caso, a maioria do material é mantido ainda em uma condição de leito acumulado, mas o movimento relativo de partículas melhora a efetividade do contato entre as fases desde que a superfície esteja continuamente exposta à ação do gás. O sistema mecânico é usado principalmente para processos que envolvem tratamento de sólidos, como calcinação, secagem e resfriamento, mas é obviamente indesejável para processos que requerem tratamento uniforme do gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Em sistemas com agitação com gás, como leito fluidizado e leito de jorro, uma forma de agitação mais intensa é dada para cada partícula sólida pela ação da corrente de gás.

O leito de jorro foi concebido originalmente e até o momento tem sido considerado como uma versão modificada de um leito fluidizado, devido à qualidade pobre de fluidização encontrada com partículas maiores. Assim, alguns livros caracterizaram o leito de jorro simplesmente como um tipo especial de leito fluidizado. Esta visão não é muito adequada, já que no seu desenvolvimento, o leito de jorro tem exibido características particulares que o faz capaz de executar certas operações que exigem movimento cíclico mais homogêneo das

partículas, que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido a seu movimento de partículas comparativamente aleatório (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O termo leito de jorro foi dado pelo National Research Council of Canada em 1954, por GISHLER e MATHUR. Estes pesquisadores desenvolveram esta técnica inicialmente como um método para secagem de trigo. Eles puderam usar uma vazão de ar quente muito maior do que na secagem convencional de trigo, sem prejuízo para o grão. Percebendo que a técnica pudesse ter aplicação mais ampla, eles estudaram as características de um leito de jorro, utilizando ar e água, como fluidos para promover o jorro com uma variedade de materiais sólidos. Com base neste estudo preliminar, eles foram capazes de afirmar que o mecanismo de fluxo de sólidos e de gás nesta técnica é diferente da fluidização, mas parece alcançar o mesmo propósito para partículas maiores, como a fluidização faz para material fino.

A principal justificativa do uso do leito de jorro na secagem de material particulado se deve à sua característica de boa agitação dos sólidos e um efetivo contato gás-sólido. Os baixos investimentos iniciais e o custo operacional, reiteram mais ainda o interesse pela aplicação do leito de jorro em secagem de cereais, como também em outros processos tais como o recobrimento de partículas (FREIRE e SARTORI, 1992).

A Figura 2.1 apresenta o esquema do leito de jorro com suas regiões características. O movimento cíclico e homogêneo das partículas no interior da coluna, propriedade particular da técnica de leito de jorro, proporciona um bom contato fluido-partícula, garantindo altos coeficientes convectivos de calor e de massa entre as fases.

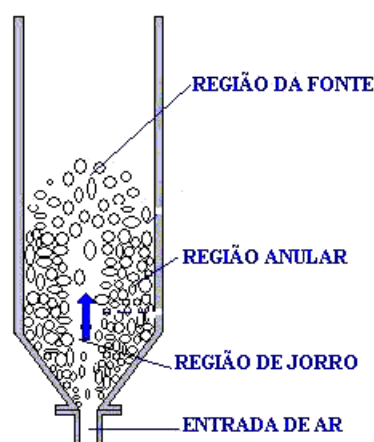


Figura 2.1 – O leito de jorro com suas regiões características.

A base cônica é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. O próprio vaso normalmente é um cilindro circular, entretanto, o

uso de um vaso completamente cônico foi prática comum em alguns estudos (PASSOS et al, 1997). O ar 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 ar 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 é caracterizada por possuir baixa porosidade.

2.1.2 – Características Fluidodinâmicas de um Leito de Jorro

O jorro é um fenômeno visualmente observável, que acontece acima de um valor de velocidade de gás para uma determinada combinação de gás, sólidos e configuração do leito.

Os sólidos ou podem ser alimentados no leito no topo, perto da parede, unindo-se à massa móvel descendente de partículas na região anular, ou com o gás entrante. Em um processo contínuo, partículas sólidas podem ser retiradas através de um orifício lateral conectado a um tubo e posicionado próximo à região da fonte, tornando contínua a saída de partículas na região anular devidamente aerada.

O mecanismo de transição de um leito estático a um leito jorrando é melhor descrito pela seguinte sequência (MATHUR e EPSTEIN, 1974):

- a) Com uma baixa velocidade do gás este simplesmente percola através das partículas sem perturbá-las e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático;
- b) Em uma certa velocidade do gás, a velocidade do jato se torna suficientemente alta para arrastar as partículas da vizinhança imediata da entrada de gás, 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;
- c) 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;
- d) Se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno relativamente oco se torna grande em comparação com os sólidos empacotados acima do jorro e assim a pressão cai;

- e) 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;
- f) 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.

O conhecimento das características do fluxo de sólidos em um leito de jorro é de grande interesse para o seu projeto e aumento de escala. Porém, no fluxo multifásico gás-sólido, a observação do movimento das partículas é difícil, devido à grande quantidade de partículas. A inserção de algumas sondas permite a medição do perfil fluidodinâmico das partículas e do gás, mas elas podem afetar o fluxo que é medido instantaneamente.

YOKOGAWA e MEISEN (1970), mostraram dados detalhados de velocidades de partículas, em um leito de jorro semi-cilíndrico, usando uma câmera de alta velocidade. Posteriormente, HE *et al.* (1994) mostraram que o efeito da existência de uma parede plana na movimentação das partículas não pode ser negligenciado quantitativamente. Os autores mediram a velocidade de partículas em um leito de jorro cilíndrico e em um semi-cilíndrico, usando uma sonda de fibra óptica e mostraram que neste último a velocidade da partícula próxima à parede plana é muito reduzida. Os autores mostraram também que na região de jorro, o perfil radial da velocidade não é parabólico conforme afirmaram pesquisadores como LEFROY e DAVIDSON (1969). Uma outra constatação foi que a velocidade das partículas na região anular aumenta com a altura na parte cilíndrica e com o decréscimo da altura na região cônica.

BENKRID e CARAM (1989) usaram fibra óptica para medir a velocidade de partículas na região anular de um leito e concluíram que existe uma região com características de um escoamento empistonado na parte acima da região anular. ROY *et al* (1994) mediram a velocidade de partículas usando uma técnica baseada na emissão de raios gama. Os autores realizaram experimentos de 3,5 horas, onde foram obtidos resultados que indicaram que os sólidos na região anular se movem em um escoamento empistonado, com uma probabilidade uniforme de passagem através da região de jorro na parte cilíndrica do leito. Na região cônica, a entrada dos sólidos na região de jorro se dá a uma pequena distância da alimentação de ar.

KAWAGUCHI *et al.* (1998), simularam a fluidodinâmica de um leito de jorro, usando modelos bi e tridimensionais, adotando uma técnica de elementos discretos. Os autores constataram que a diferença na movimentação das partículas calculadas em 2D e 3D é proeminente no início do jorro. Porém, uma vez estabelecido o regime de jorro os resultados obtidos para 2D e 3D foram muito próximos, exceto nas regiões próximas as paredes do leito. Os autores concluíram também que o efeito do coeficiente de fricção é mais evidenciado quando se trabalha com tubo “draft”.

CASSANELLO *et al.* (1999), estudaram a dinâmica de sólidos através de trajetórias experimentais de uma partícula simples em leito de jorro por meio de uma técnica de acompanhamento das partículas radioativas. Os resultados mostraram a existência de um tempo ou período de ciclo das partículas no seu caminho no interior do leito, sendo a dinâmica dos sólidos fortemente relacionada com a velocidade do gás.

KAWAGUCHI *et al.* (2000), realizaram uma simulação numérica quasi-tridimensional de um leito de jorro cilíndrico. Neste estudo a movimentação do fluido é obtida bidimensionalmente, enquanto que o movimento das partículas é calculado tridimensionalmente. Os resultados calculados foram comparados com os resultados experimentais de HE *et al.* (1994) e de ROY *et al.* (1994). Embora tenham obtido boas aproximações no comportamento qualitativo o mesmo não ocorreu na avaliação quantitativa.

OLAZAR *et al.* (2001), estudaram o efeito das condições operacionais na velocidade de sólidos nas regiões de jorro, fonte e anular de um leito de jorro. Neste trabalho os autores avaliaram a aplicabilidade de algumas equações empíricas e semi-empíricas da literatura e outras por eles propostas na previsão de velocidade de partículas nas diferentes regiões do jorro. Estes autores têm dado uma importante contribuição no estudo de perfil de queda de pressão, velocidade e tempo de residência, dentre outras propriedades do fluido e partícula, para o leito de jorro cônico e cônico-cilíndrico.

LADEIRA e PASSOS (2002), fizeram um estudo experimental e de simulação, onde foram obtidos valores de queda de pressão e distribuição do fluido na região anular tanto para a geometria cilíndrica quanto cônica ou cônico-cilíndrica. Diferentes fluidos e partículas foram utilizados na comparação de dados, comprovando a abrangência do modelo analisado e a sua aplicabilidade para o escoamento do ar em secadores de leitos de jorro com grãos (partículas não esféricas).

LARACHI *et al.* (2002), estudaram a circulação e mistura de sólidos em leito de jorro. Neste estudo foram avaliadas as características fluidodinâmicas em quatro regiões do leito:

cilíndrica anular, cônica anular, jorro e fonte. Os autores evidenciaram que partículas na região cilíndrica anular podem se transferir para a região de jorro através da interface.

ISHIKURA *et al.* (2003), estudaram a fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft (tubo interno) poroso e sem poros contendo uma pequena quantidade de partículas finas. Informações como altura da fonte, diâmetro do jorro e taxa de recirculação das partículas foram analisadas e comparadas para diferentes configurações.

Uma propriedade importante no estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro é a distribuição de porosidade nas regiões que compõe o leito. A porosidade na região anular de um leito de jorro é usualmente considerada constante e igual à de um leito empacotado conforme descrito por MATHUR e GISHLER (1955).

HE *et al.* (1994) usaram fibra óptica para medir a porosidade local em leito de jorro e concluíram que na região de jorro ela decresce com a altura e aumenta com a distância radial. Neste trabalho os autores constataram que exceto para uma região próxima à interface jorro-anulus, a porosidade na região anular é maior que a de um leito empacotado e que esta aumenta com o aumento da vazão de gás. Os autores mostraram também que o perfil radial de porosidade é altamente parabólico na porção menor do jorro, e nem tanto a níveis mais altos. Uma constatação interessante deste trabalho é que existe pouca diferença entre o perfil de porosidade em um leito de jorro cilíndrico e um leito semi-cilíndrico, ao contrário do que os autores constataram para o caso da velocidade das partículas.

A técnica da fluidodinâmica computacional (CFD) é uma interessante ferramenta de simulação para a compreensão dos fenômenos envolvidos na fluidodinâmica de um leito de jorro. Esta técnica mostra-se muito promissora, visto o nível de detalhamento e a qualidade dos resultados que podem ser obtidos. A seguir será feita uma breve descrição sobre CFD.

2.2 – Um breve histórico da Fluidodinâmica Computacional

Até o início do século XIX o estudo dos fluidos foi efetuado essencialmente por dois grupos: hidráulicos e matemáticos. Os hidráulicos trabalhavam de forma empírica, enquanto os matemáticos se concentravam na forma analítica. O grande número de experiências do primeiro grupo, freqüentemente engenhosas, forneceu informações de inestimável importância para o engenheiro prático da época. Entretanto, por falta de aplicações da teoria existente, esses resultados eram restritos e de valor limitado a situações novas. Os matemáticos, por sua vez, devido à não-obtenção das informações experimentais, eram

forçados a determinadas simplificações, de forma que seus resultados ficavam freqüentemente à margem da realidade.

Tornou-se claro para alguns pesquisadores iminentes, como Reynolds, Froude, Prandtl e Von Kármán, que o estudo dos fluidos deve consistir em uma combinação da teoria e da experiência, dando assim início à ciência da mecânica dos fluidos como se conhece hoje.

O trabalho de RICHARDSON (1910) é considerado por muitos autores como sendo pioneiro no desenvolvimento de métodos numéricos aplicados ao estudo da fluidodinâmica.

Durante esta época surgiram algumas poucas contribuições na análise numérica. Anos depois, em 1950, SOUTHWELL e ALLEN desenvolveram e aplicaram um esquema de relaxação, para realizar um dos primeiros cálculos de escoamento viscoso incompressível sobre um cilindro. Esta solução foi obtida com cálculos manuais, demandando uma grande quantidade de tempo. DOUGLAS e RACHFORD (1956) desenvolveram uma nova família de métodos implícitos, para equações elípticas e parabólicas. Livros tratando de vários aspectos da análise numérica aplicada à dinâmica dos fluidos começaram a surgir no início dos anos 60, como o livro de FORSYTHE e WASON (1960), que enfatizava métodos para problemas com equacionamento elíptico e o livro de RICTMYER e MORTON (1967), que representava uma importante fonte de informação para solução de problemas com marcha no tempo.

Apesar dos enormes esforços no desenvolvimento de métodos numéricos aplicados a dinâmica dos fluidos, até 1965, os métodos computacionais foram utilizados na indústria aerodinâmica somente para análise estrutural. Esta indústria foi a principal impulsionadora dos estudos e do avanço da fluidodinâmica computacional.

A contribuição dos pesquisadores nesta área tem sido ampla e diversa permitindo o estudo de problemas envolvendo escoamentos viscosos compressíveis instáveis e o uso de malhas não estruturadas, para cálculos de escoamentos (SILVA, 1996).

O computador abriu novas possibilidades para a abordagem deste problema, com a utilização de cálculos de soluções para os mais completos modelos matemáticos. Atualmente os PC's já apresentam velocidade e memória suficientes para o estudo de sistemas complexos.

Tendo em vista o avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores, um grande progresso tem sido obtido na geração de “softwares” de CFD comerciais. Os códigos CFD comerciais são mais que simples resolvidores de sistemas de equações, estes códigos permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento da solução ao longo das iterações e disponibilizam um “display” de resultados com alta capacidade gráfica para geração dos resultados.

2.3 – Fluidodinâmica Computacional em Sistemas Multifásicos

2.3.1 – Modelagem Básica Empregada em Escoamentos Multifásicos

A Fluidodinâmica Computacional consiste na solução de equações gerais de transporte empregando métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos, visando obter campos de velocidades, temperatura e etc..., possibilitando dessa forma, avaliar o transporte de uma propriedade de interesse. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da Engenharia Química, onde a maioria dos processos envolve mais de uma fase, o que acarreta uma dependência da transferência de massa e reação química com a concentração local e as superfícies de transferência locais, interfaces gás/líquido, gás-partícula, etc...

O leito de jorro é um exemplo de modelagem multifásica que envolve a fase fluida (ar) e fase sólida (partículas). No caso de secagem em leito de jorro o balanço de energia deve ser considerado e fenômenos de transferência de massa e calor entre as fases não podem ser negligenciados, acarretando uma maior complexidade na modelagem e solução do modelo adotado.

O estudo de fluidodinâmica de equipamentos como o leito de jorro que envolve escoamento multifásico pode ser dividido em duas abordagens:

- Euler-Euler;
- Euler-Lagrange.

Pela abordagem Euler-Lagrange, a fase discreta é tratada de forma lagrangeana. Tal fato implica em modelar a fase contínua pela resolução das equações de Navier-Stokes no tempo médio, completamente ausente da fase discreta, e *a posteriori*, utilizar as informações fluidodinâmicas previamente levantadas, como dados de entrada para a descrição do comportamento da fase discreta. Ressalta-se que esse tipo de abordagem é procedente somente naqueles casos em que a fase secundária (discreta) ocupa uma pequena fração volumétrica do sistema.

Por outro lado, a abordagem Euler-Euler, do ponto de vista matemático, considera que as diferentes fases do sistema se interpenetram. Outrossim, como o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo da outra, surge então, o conceito de fração volumétrica de fase. Estas frações volumétricas de fase são consideradas como funções contínuas no tempo e no espaço, cuja soma de todas, equivale evidentemente à unidade. Equações de conservação para cada uma das fases, são apresentadas para modelar o escoamento multifásico. Por sua vez, relações

constitutivas, de cunho empírico ou teórico, são necessárias a fim de satisfazer ao clássico problema de (“fechamento”) definição correta do número de graus de liberdade do modelo final.

Neste trabalho foi usada a descrição Euler-Euler, a qual é melhor detalhada na sequência.

2.3.1.1– Modelagem Euler-Euler

Pode se estabelecer dois procedimentos para utilização do vetor velocidade $v(x,y,z,t)$ nos cálculos que envolvam o movimento de partículas em um fluido que escoar. Por exemplo, estipulando coordenadas fixas x_1 , y_1 e z_1 nas funções de campo de velocidade, podemos exprimir a velocidade das partículas que passam por essa posição em qualquer instante. Matematicamente pode se escrever $v(x_1, y_1, z_1, t)$. Esta visão é chamada de Euleriana.

No ponto de vista Euleriano, deve-se usar a lei de Newton para cada partícula de um escoamento e necessita-se da razão de variação da velocidade de cada partícula em um escoamento. Assim, observando que x , y , z são funções do tempo, pode-se estabelecer o campo de aceleração pelo emprego da regra da cadeia da diferenciação parcial da seguinte maneira.

$$a = \frac{d}{dt} v(x, y, z, t) = \overbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right)}^{\text{Aceleração de Transporte ou Convectiva}} + \overbrace{\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)}^{\text{Aceleração Local}} \quad (2.1)$$

A aceleração das partículas fluidas em um campo de escoamento pode ser avaliada pela superposição de dois efeitos, que são dados a seguir.

- 1- Em um dado instante t , admite-se que o campo fique permanente. A partícula, em tais circunstâncias, está para mudar de posição nesse campo permanente. Dessa forma, ela está efetuando uma mudança de velocidade em várias posições neste campo em cada instante t . Essa razão de variação de velocidade com o tempo, devido à mudança de posição no campo é chamada de aceleração de transporte, ou aceleração convectiva, e é dada pelos termos no primeiro parêntese da equação de aceleração precedente.
- 2- O termo do segundo parêntese, nas equações de aceleração, não aparece devido à mudança de posição da partícula, mas sim pela razão de variação

do campo de velocidade na posição ocupada pela partícula no instante t , a qual é chamada de aceleração local.

A experiência indica que, na faixa de interesse da engenharia, quatro leis básicas devem ser satisfeitas para qualquer meio contínuo. São elas:

- 1 conservação da matéria (equação da continuidade);
- 2 segunda lei de Newton (equação da quantidade de movimento);
- 3 conservação da energia (primeira lei da termodinâmica);

A Equação (2.2) a seguir representa a lei da conservação de uma propriedade ϕ , considerando que:

$\phi = 1$, conservação da massa;

$\phi = u, v, w$, balanço da quantidade de movimento;

$\phi = E$, balanço de energia;

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{acúmulo}} + \underbrace{\text{div}(\rho u\phi)}_{\text{convecção}} = + \underbrace{\text{div}([- \Gamma \text{grad} \phi])}_{\text{difusão}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{geração; destruição}} \quad (2.2)$$

Além dessas leis gerais, existem numerosas relações constitutivas, que se aplicam a tipos específicos de meio. A Tabela 2.1 apresenta algumas relações constitutivas típicas.

Tabela 2.1- Relações constitutivas

Gradiente Fluxo	Velocidade	Temperatura	Concentração
Quantidade de movimento	Lei de Newton		
Energia		Lei de Fourier	
Massa			Lei de Fick

As equações são obtidas a partir da conservação da massa, energia e de momento, aplicadas a cada elemento de volume da formulação Euler-Euler, consistindo nas equações da Continuidade e de Navier-Stokes para fases gasosa e sólida. Estas equações são necessariamente transformadas em sistemas de equações na forma discreta. Os métodos de discretização mais utilizados são:

- Diferenças finitas;
- Volumes finitos;

- Elementos finitos;
- Método híbrido, volumes finitos/elementos finitos;
- Métodos espectrais.

A fluidodinâmica a ser modelada pode envolver os seguintes tipos de escoamento:

- Estacionário e não estacionário;
- Parabólicos, hiperbólicos e elípticos;
- Compressíveis ou incompressíveis;

Dependendo da configuração do escoamento, diferentes métodos de correção da pressão (acoplamento velocidade pressão) podem ser adotados.

A maioria dos softwares de CFD existentes utilizam o método dos volumes finitos, visto que este método garante resultados razoáveis até mesmo para malhas grosseiras e não estruturadas.

2.4–Volumes Finitos

A maioria dos 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 volume finitos, é equivalente aos princípios de conservação sobre cada volume de controle. Quando não ocorrer 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 de volumes finitos atrativo e fisicamente consistente.

No âmbito do método dos volumes finitos, o tipo de função de interpolação que se adota pode ser considerado como uma das principais características de um modelo numérico, senão a principal, responsável pela qualidade da solução obtida. Entende-se por função de interpolação o meio utilizado para se expressar o valor da incógnita do problema e de suas derivadas normais, nas faces dos volumes de controle que são usados para discretizar o domínio de cálculo.

Neste sentido, muitos métodos de interpolação são utilizados para a solução das equações de transporte, visando a diminuição da difusão e dispersão numéricas. As difusões numéricas geralmente são menores quando a função interpolação é de alta ordem, mas em contrapartida, geralmente apresenta oscilações que podem comprometer totalmente o significado físico da solução obtida.

Os principais passos que devem ser seguidos para o desenvolvimento e implementação de esquemas numéricos são:

- a escolha adequada da localização das variáveis dependentes na malha;
- o tratamento do acoplamento entre a pressão e a velocidade;
- a obtenção da função de interpolação entre os pontos discretos;
- a escolha da seqüência de solução das equações diferenciais;
- a escolha do método de solução do sistema de equações lineares.

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 do 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). Tal característica é retratada na Figura 2. 2.

Supondo a distribuição de velocidade de ar no interior da parte cilíndrica de um leito de jorro, sabe-se que a velocidade diminuirá do centro para a parede do leito; de modo análogo à curva real (solução exata) mostrada na Figura 2.2, que retrata três soluções numéricas que satisfazem as condições de contorno: $v(0)$ =Velocidade Máxima e $v(R)$ =zero, embora nem todas apresentem realismo físico, após a convergência.

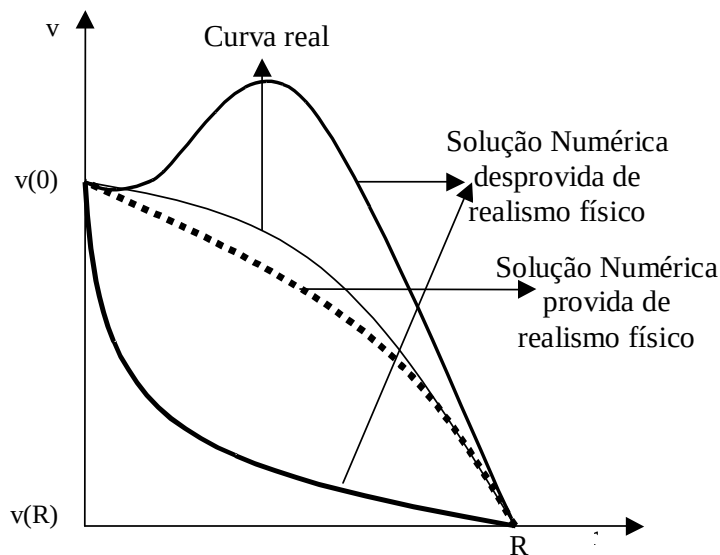


Figura 2.2 - Soluções dotadas e desprovidas de realismo físico.

O Método dos Volumes Finitos, quando converge, fornece resultados dotados de realismo físico, o que não quer dizer que os mesmos sejam acurados: a solução numérica se aproxima

da solução exata dentro de uma exatidão estabelecida, pois os resultados das simulações fornecem o comportamento do modelo, o qual depende das simplificações e considerações feitas visando retratar os fenômenos mais relevantes no sistema real e tornar as equações mais manuseáveis, bem como da precisão dos parâmetros envolvidos.

Uma descrição mais detalhada do método de Volumes Finito é apresentada no ANEXO 1 que se refere a metodologia empregada por BARREIRA 2003. O ANEXO 2 trata dos modelos multifásicos disponíveis no software FLUENT[®] e suas principais características.

Uma das mais importantes e significantes áreas de avanço em CFD nas últimas décadas tem sido a flexibilidade das malhas. Atualmente os softwares permitem refinamentos detalhados em regiões específicas de um equipamento. Estes códigos possuem diferentes esquemas de interpolação e métodos de discretização que podem ser adotados conforme exigência de estabilidade ou outros critérios que o usuário julgue importantes.

2.5 – Geração de Malhas Computacionais de Discretização

A geração de malha é citada freqüentemente como a parte mais importante e que consome um maior tempo na análise de CFD. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise, independente do tipo de resolvido de fluxo usado. Adicionalmente, os códigos CFD serão mais robustos e eficientes ao usar uma malha bem construída. Pensando nisto, é fundamental que o analista de CFD conheça detalhadamente os vários métodos de geração de grade. Só sabendo bem os métodos será possível selecionar a ferramenta certa para resolver o problema em mãos. Dentre os métodos disponíveis atualmente destacam-se os métodos citados nos itens a seguir.

2.5.1– Métodos de Malha Estruturada

Os métodos de malha estruturada possuem este nome devido ao fato de que a malha é disposta em um padrão regular repetido, chamado de bloco. Estes tipos de grades utilizam elementos quadriláteros em 2D e elementos hexahédricos em 3D em uma malha regular computacional. Malhas estruturadas apresentam uma considerável vantagem sobre outros métodos 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.

Embora a topologia de elemento seja fixa, a grade pode ser moldada para sofrer alterações como torção ou esticamento. Geradores de malhas bem estruturadas utilizam equações elípticas sofisticadas para aperfeiçoar a forma da malha automaticamente buscando a uniformidade e ortogonalidade.

Inicialmente as malhas estruturadas consistiam de um único bloco e a extensão das malhas estruturadas ou quasi-estruturadas por todo o domínio era feita pela conexão de vários blocos. Com o desenvolvimento das técnicas de geração de malhas surgiu o sistema multiblocos estruturados, ou seja, esquemas de geração de grade que permitem conectar vários blocos juntos e construir o domínio inteiro. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de malha multibloco estruturada, onde as regiões com diferentes cores referem-se aos blocos que foram interconectados.

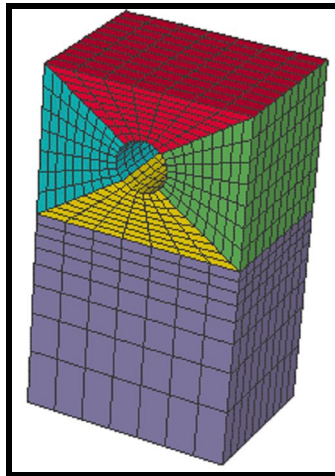


Figura 2.3 – Malha multibloco estruturada usando conexão ponto a ponto.
(fonte:<http://www.cfdreview.com>, acessado em abril 2004).

Os métodos multibloco geralmente incluem conexão ponto a ponto, onde os blocos têm que emparelhar topologicamente e fisicamente aos contornos. Enquanto grades de multiblocos dão para o usuário mais liberdade para construir a malha, as exigências de conexão podem restringir e dificultar a construção da malha. Adicionalmente, os vários graus de liberdade de conectividade de blocos podem gerar maior precisão da solução ou robustez do resolvedor.

Quando uma malha está alinhada ao fluxo esta gera maior precisão dentro do resolvedor. Resolvedores de blocos estruturados requerem uma menor quantidade de memória para um determinado tamanho de malha e executam mais rapidamente os cálculos.

A desvantagem principal de malhas de blocos estruturados é o tempo e perícia exigida para se obter uma ótima estrutura de bloco. Algumas geometrias, como a parte cônica de um leito de jorro, não comportam formatos de blocos estruturados. Nestas situações o usuário é

forçado a torcer ou deformar enormemente os elementos da malha. Tempos de geração de malhas para casos mais extremos são normalmente medidos em dias ou até semanas.

2.5.2– Métodos de Malha Não-Estruturada

Métodos de malha não-estruturadas utilizam uma coleção arbitrária de elementos para preencher o domínio. Como o arranjo de elementos não tem nenhum padrão discernível, a malha é chamada não-estruturada. Estes tipos de grades geralmente utilizam triângulos em 2D e tetrahedros em 3D. Como ocorrem com as malhas estruturadas, os elementos podem sofrer deformações para se ajustar ao domínio.

Uma vez definido o domínio no qual se deve gerar a malha, pode-se adicionar triângulos automaticamente na superfície e tetrahedros no volume com pouca contribuição do usuário. Isto é mais facilmente obtido devido à maior flexibilidade na conexão dos elementos de malhas. A Figura 2.4 ilustra uma malha não-estruturada típica.

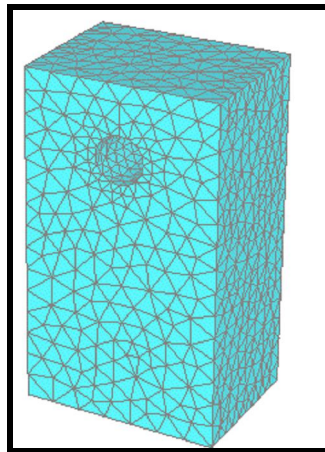


Figura 2.4 – Malha não-estruturada composta de elementos triangulares e tetrahédricos.
(fonte:<http://www.cfdreview.com>, acessado em abril 2004).

A vantagem de métodos de malha não-estruturada é que eles são muito automatizados e requerem menor esforço do usuário e tempo para construção. O usuário não precisa se preocupar com a disposição dos blocos, estrutura ou conexões. Métodos de malhas não-estruturadas também habilitam a solução de problemas muito complexos e detalhados em um período relativamente curto de tempo.

A principal desvantagem de malhas não-estruturadas é a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha. Notadamente, o usuário nestes casos se restringe a definir os limites e tamanho das células da malha. Os elementos triangulares e tetrahédricos apresentam o problema de não se acomodarem bem às deformações do corpo. Esta malha é geralmente

limitada, sendo largamente isotrópica com elementos apresentando mesmo tamanho e formato.

Este é o principal problema ao tentar refinar a malha em uma área local, já que freqüentemente são exigidas malhas com densidades de ponto definidas localmente. Códigos que resolvem problemas de malha não-estruturada requerem mais memória e têm execução mais longa que códigos que resolvem malhas estruturadas.

2.5.3– Métodos de Malha Híbridas

A vantagem de métodos de malha híbrida é a utilização das propriedades positivas de elementos de grade estruturadas nas regiões de mais detalhamento e de malha não-estruturada 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 2.5 representa um exemplo de malha híbrida.

As desvantagens dos métodos híbridos é que eles exigem muita prática e experiência na geração de malhas em corpos com geometrias complexas. Métodos híbridos são tipicamente menos robustos que métodos de malhas não-estruturadas. A geração das porções estruturadas da malha freqüentemente apresentam problemas de conexão devido a geometria complexa.

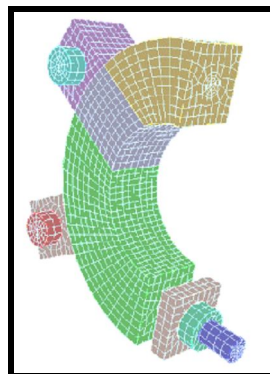


Figura 2.5 - Malha híbrida
(fonte:<http://www.cfdreview.com>, acessado em abril 2004).

2.6 – Métodos de Linearização e de Solução do Sistema de Equações Linearizadas utilizadas pelo FLUENT®

O FLUENT® permite escolher os seguintes métodos de resolução numérica:

- Resolvedor segregado;

- Resolvedor acoplado.

Nas duas situações é usada a seguinte técnica, baseada no volume de controle:

- Discretização do domínio através de volumes finitos;
- Integração das equações governantes nos volumes de controle individuais para construção de equações algébricas para as variáveis dependentes discretas, assim como velocidade, pressão, temperatura, e grandezas escalares conservadas;
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equações lineares resultante para obter valores atualizados das variáveis dependentes.

Os dois métodos numéricos disponíveis empregam um processo de discretização similar (volumes finitos), mas a aproximação usada para linearizar e resolver as equações discretizadas são diferentes.

Uma descrição mais detalhada destes métodos numéricos de discretização e de solução das equações linearizadas é apresentada no ANEXO 3.

Como mencionado anteriormente, o leito de jorro tem-se mostrado uma ótima opção no recobrimento e inoculação de sementes de soja. Uma breve revisão sobre os equipamentos usados para este fim e sobre esta leguminosa é apresentada no tópico a seguir.

2.7 – Inoculação de Sementes de Soja

Uma importante aplicação do leito de jorro é na inoculação de sementes de soja, a qual tem sido estudada desde 1997 no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da UFU. Um dos fatores que motivam este estudo é a importância comercial da soja, que representa um dos principais produtos de exportação do Brasil e que tem tido um importante crescimento na região do Triângulo Mineiro.

MIYASAKA (1986) sugere que o cultivo ou domesticação da soja é bastante antigo, tendo sido iniciado na Ásia, mais precisamente na China entre, 1500–1027 AC.. Apesar de sua existência milenar, a soja somente chegou ao Brasil por volta de 1935, mais precisamente no Rio Grande do Sul espalhando-se para o estado de São Paulo, seguido do Paraná, e posteriormente para vários outros estados.

Atualmente, a soja é a segunda maior lavoura do país ocupando aproximadamente 12,5 milhões de hectares, espalhados em mais de 17 estados com mais de 243 mil produtores (pequenos, médios e grandes). O complexo de soja é um dos principais itens da Balança Comercial Brasileira e a exportação em 2005 foi da ordem de US\$ 10,00 bilhões. A produção

de soja alcançou 61,5 milhões de toneladas em 2005 (fonte: www.geominas.com.br, acesso julho 2005).

Minas Gerais é um dos Estados Brasileiros com maior crescimento percentual na área cultivada (8,04% ao ano), sendo a região do Triângulo Mineiro a mais ativa na produção desta leguminosa.

A Figura 2.6 na seqüência mostra que a maior parte do estado de Minas Gerais está apta para a cultura da soja, tendo o estado um futuro promissor na produção desta leguminosa.

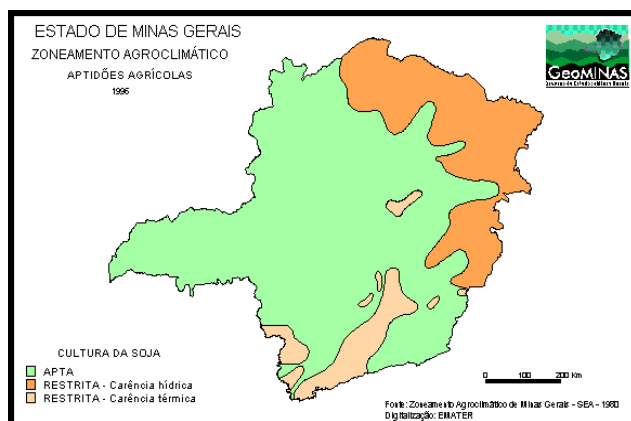


Figura 2.6 - Aptidão agrícola da cultura da soja no estado mineiro (fonte: Geominas.com.Br (acessada em julho 2005)).

Atualmente o Triângulo Mineiro ocupa lugar de destaque no Agronegócio do Estado, sendo responsável pela produção de 90% da soja colhida em Minas Gerais. Isto se deve a uma excelente topografia, altitude, qualidade de solo, precipitação e uma privilegiada localização.

Dos 15 milhões de hectares potencialmente utilizáveis para a produção de grãos, apenas 14% são cultivados. Assim, com todas as suas vantagens estruturais, a região pode contribuir, ainda mais, para o crescimento da produção brasileira de grãos e para que a agricultura atenda às demandas externas, especialmente para a China.

2.7.1 – Qualidade das Sementes de Soja

Todo processo de beneficiamento de sementes requer amplo domínio de sua técnica. Essa idéia advém da necessidade de garantir que todas as características biológicas das sementes, indispensáveis para a sua germinação e crescimento, sejam preservadas. Toda nova técnica ou processo, empregados para beneficiar sementes, devem se valer da idéia anterior e de um

conceito geral de qualidade de sementes, para que sua viabilidade seja avaliada. Uma definição geral de qualidade de sementes pode ser dita como o somatório de todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que contribuem para a formação de plantas vigorosas, capazes não só de promover uma rápida emergência, mas também de garantir o seu estabelecimento, além de proporcionar crescimento e floração uniformes, garantindo dessa forma uma elevada produtividade (BARROZO,1995).

Alguns métodos padronizados são usados para a verificação da qualidade de sementes submetidas a qualquer processo que as envolvam em possíveis alterações fisiológicas e físicas. A avaliação fisiológica é feita tradicionalmente através de índices de germinação; porém, esses testes não são suficientes para garantir boa capacidade de desempenho da planta no campo. Diante disso, testes de vigor também são recomendados para a avaliação da qualidade fisiológica das sementes. Para a avaliação dos danos mecânicos, geralmente são utilizados testes que quantificam os índices de fissuras das sementes (MARCOS FILHO et al.,1987).

2.7.2 – Equipamentos Usados na Inoculação de Sementes de Soja

Os processos de recobrimento de materiais particulados no campo são tradicionalmente realizados em equipamentos conhecidos como “máquinas de tratamento de sementes”. Estas máquinas são utilizadas para tratar diferentes tipos de sementes e possuem como principal vantagem uma alta capacidade de processamento. Estas máquinas tratam até 12 toneladas de sementes por hora.

Durante muito tempo se inoculou sementes de soja utilizando betoneiras ou tambor rotatórios, porém estes equipamentos tratam uma quantidade muito pequena de sementes e empregam um número elevado de mão de obra quando comparados às “máquinas de tratamento”. Assim, atualmente as “máquinas de tratamento de sementes” tem se tornado o principal mecanismo de inoculação de sementes de soja no campo.

As Figuras 2.7 e 2.8 mostram respectivamente dois tipos de “máquinas de tratamento de sementes” utilizadas neste trabalho na inoculação de sementes de soja: Bandeirantes e Syngenta. Estas máquinas possuem um sistema com rosca sem fim com ajuste de vazão de sementes.

A máquina Bandeirantes apresentada na Figura 2.7 possui 4 compartimentos nos quais são colocados: sementes (compartimento maior), fungicida, micronutrientes e inoculante, sendo estes últimos na forma sólida. A máquina Syngenta apresentada na Figura 2.8 possui um

único compartimento onde é adicionada a solução contendo fungicida, micronutrientes e inoculante, todos na forma líquida. Neste tipo de equipamento a alta capacidade de processamento é uma das principais justificativas de seu uso.



Figura 2.7 – Máquinas de inoculação de sementes: Bandeirantes



Figura 2.8 – Máquinas de inoculação de sementes: Syngenta

A literatura não apresenta estudos a respeito do impacto do revestimento realizado nestas máquinas sobre a qualidade da semente. Não são disponíveis também, informações sobre a homeogeneidade do produto final. No entanto, estas informações e estudos são de fundamental importância para justificar a sua utilização, e caso necessário, promover alterações ou buscar outras alternativas para inoculação de soja.

O leito de jorro é uma técnica alternativa para o recobrimento de partículas, apresentando as seguintes vantagens quando comparado aos equipamentos anteriormente citados (LUCAS 2000):

- a) as partículas são simultaneamente recobertas e secas no leito de jorro;
- b) obtenção de recobrimento mais uniforme, e
- c) o leito de jorro é mecanicamente simples, não possuindo partes móveis.

O revestimento de partículas em leito de jorro com spray é feito como mostra a Figura 2.9. As partículas são revestidas à medida que atingem a região da fonte e gotículas do material pulverizado são aderidas à sua superfície. Após o contato partícula-material recobridor, devido à ação do ar de jorro que percola o leito, inicia-se o processo de secagem, que se estende durante todo o ciclo, finalizado quando as partículas retornam à região da fonte, após passarem pela região anular e serem novamente arrastadas pelo ar na região de jorro.

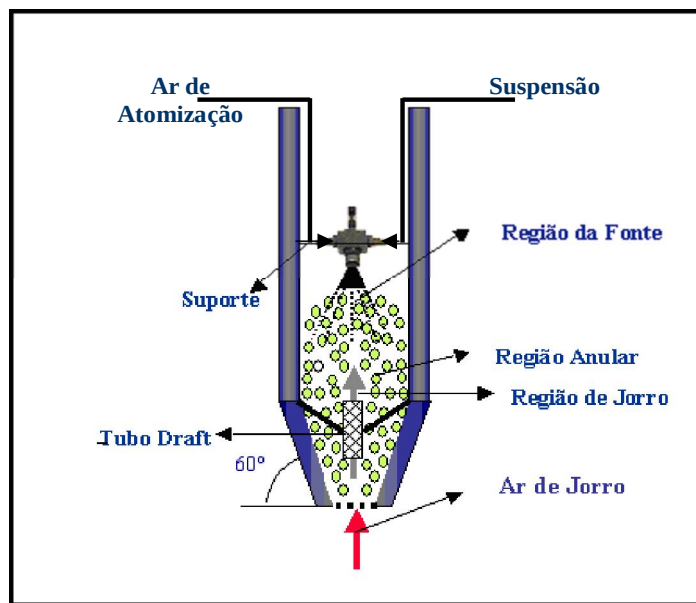


Figura 2.9 – Esquema geral para o recobrimento de partículas em leito de jorro.

LUCAS (2000) estudou a inoculação de sementes de soja com bactérias *Bradyrhizobium* em leito de jorro, sem tubo draft. Este autor analisou os efeitos das variáveis, vazão de ar de jorro, vazão de ar de atomização e vazão de suspensão sobre a eficiência do processo e a qualidade final das plantas.

Além disso, o autor avaliou a interferência do processo de recobrimento, sobre a qualidade das sementes e concluiu que o índice de germinação situou-se acima dos 95 pontos percentuais, os índices de vigor tiveram valores acima de 86% e os índices de sementes não fissuradas foram sempre superiores a 97%. Esses resultados indicam que o processo causa um prejuízo muito pequeno à qualidade das sementes.

Lucas (2000) mostrou ainda que as sementes com micronutrientes e inoculante formam plantas maiores e mais saudáveis, como ilustrado pela Figura 2.10. Essa aparência é decorrente do fornecimento de nitrogênio pela bactéria *Bradyrhizobium* às plantas inoculadas.

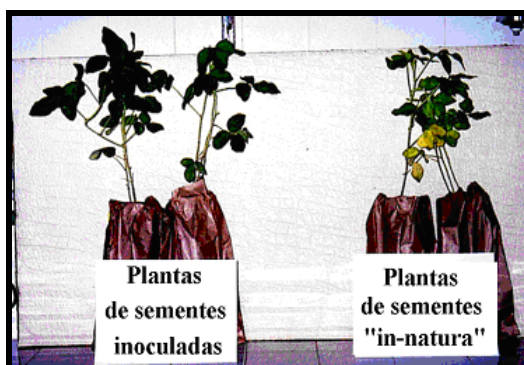


Figura 2.10 – Comparação entre plantas *in natura* e recobertas (Fonte=Lucas (2000))

A simples presença do *Bradyrhizobium* estimula a planta a produzir nódulos nas raízes, onde ocorre a simbiose, portanto, a quantidade e o tamanho dos nódulos podem ser indicativos da qualidade da planta. As plantas recobertas possuem uma quantidade e tamanho médio de nódulos superiores aos existentes em plantas de sementes *in natura*.

As Figuras 2.11 e 2.12 referem-se a uma comparação entre raízes de semente de soja *in natura* e semente de soja recoberta em leito de jorro com micronutrientes e inoculante. Nota-se que as raízes de planta oriunda de sementes recobertas, ao contrário das sementes *in natura*, apresentam um elevado número de nódulos.

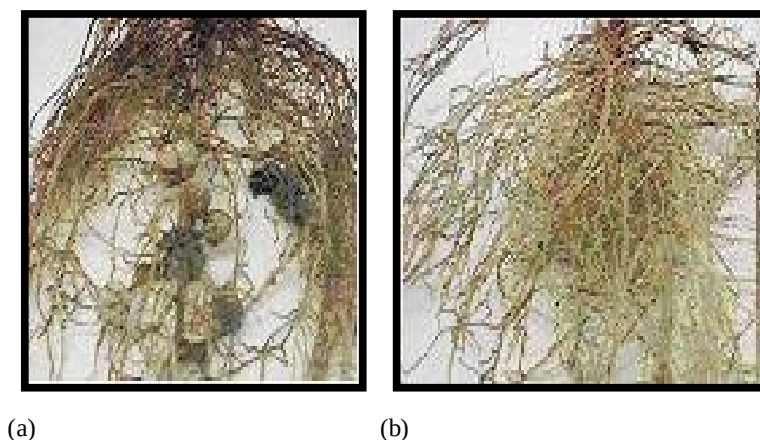


Figura 2.11 – Raízes de plantas de soja com inoculante (a) e sem inoculante (b)
(Fonte=Lucas (2000))

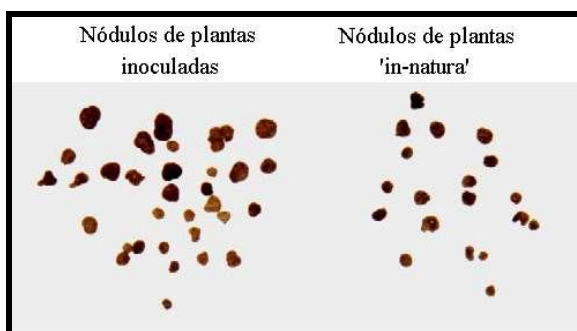


Figura 2.12 – Comparação entre nódulos das plantas de sementes inoculadas e *in natura*.
[Fonte=Lucas (2000)]

A evidência da atuação da bactéria *Bradyrhizobium* nos nódulos das plantas é detectada pela coloração rósea no interior dos nódulos. Isto se deve à presença da Leghemoglobina, responsável pelo transporte do nitrogênio, utilizado pela *Bradyrhizobium* no interior do nódulo da planta de soja. Sem essa bactéria, a planta não assimila nitrogênio, não possui a Leghemoglobina, portanto, o interior de seus nódulos não possui coloração rósea.

A Figura 2.13 apresenta uma comparação da coloração encontrada no interior dos nódulos de plantas recobertas e *in natura*. A coloração rósea está presente no interior dos nódulos de plantas recobertas, enquanto que o interior dos nódulos das plantas “in-natura” possui um aspecto esbranquiçado ou escurecido.

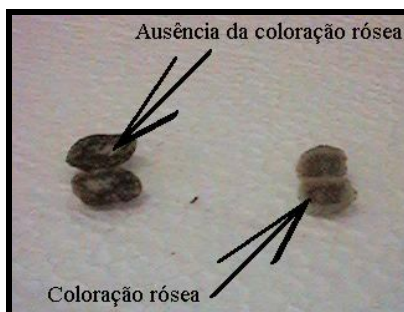


Figura 2.13 – Comparação entre a coloração de nódulos de plantas recobertas e *in natura*.
[Fonte=Lucas (2000)]

No trabalho de LUCAS (2000) não foi avaliada a distribuição da massa de recobrimento nas sementes de soja. O conhecimento desta distribuição é de fundamental importância, pois as camadas muito espessas prejudicam a germinação das sementes por impedirem as trocas gasosas, enquanto as muito finas não garantem a atividade ideal da bactéria no processo de fixação de nitrogênio e podem não conter a quantidade ideal de micronutrientes.

Neste contexto, é importante prever a distribuição de massa de sementes de soja recobertas com inoculante e micronutrientes em leito de jorro, o que pode ser feito, utilizando um modelo de balanço populacional devidamente validado através de dados experimentais confiáveis.

2.8 – Desenvolvimento de Um Modelo Matemático do Recobrimento Usando Balanço Populacional

As equações de balanço populacional possuem uma ampla aplicação em vários processos, incluindo cristalização, precipitação, polimerização, revestimento de partículas, flotação, fermentação e peletização dentre outros.

O uso de modelos de balanço populacional tem tido um forte crescimento nos últimos anos, devido ao avanço dos recursos computacionais, fundamentais para a implementação de códigos computacionais necessários à solução dos sistemas de equações em muitos casos extremamente complexos. Um dos trabalhos pioneiros envolvendo equações de balanço de

população aplicados a um processo de cristalização, foi publicado por RANDOLPH e LARSON (1962). LIN e FAN (1963) estudaram sistemas de fluxos utilizando balanço populacional para descrever o tempo de residência de elementos de fluido em reatores.

Em 1971 RANDOLPH e LARSON publicaram o livro “Theory of Particulate Processes”, que se tornou uma referência para o desenvolvimento de vários outros trabalhos subseqüentes. Neste trabalho, os autores apresentaram modelos para distribuição de tamanho de partículas, modelos de função distribuição–densidade, além do desenvolvimento da equação de balanço populacional a partir da equação da continuidade, bem como vários outros tópicos relacionados a processos de cristalização. A equação de balanço populacional proposta pelos autores é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(Nf(L)) + \frac{\partial}{\partial L}(GNf(L)) + D - B = 0 \quad (2.3)$$

Os termos G , B e D representam o termo convectivo da propriedade de estado, a taxa de aparecimento e desaparecimento de partículas em uma faixa de propriedade de estado, respectivamente. N é o número total de partículas, $f(L)$ a função distribuição, t o tempo e L uma propriedade de estado. Uma propriedade de estado designa qualitativa ou quantitativamente uma propriedade física ou química da partícula. Por exemplo, entende-se como propriedade de estado, a atividade catalítica de uma partícula de catalisador, o tamanho de uma partícula ou a massa de uma semente em processos de revestimento, o tempo de residência de elementos de fluido no interior de reatores, o diâmetro de bolhas em processos de flotação, dentre outros. No caso da Equação (2.3), a propriedade de estado no estudo de RANDOLPH e LARSON (1971) foi o comprimento L dos cristais.

Com o objetivo de melhor ilustrar o significado dos termos G , B e D é apresentada a Figura 2.14.

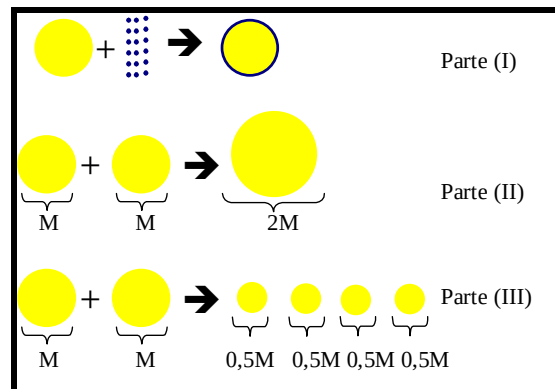


Figura 2.14 – Esquema ilustrativo dos eventos de crescimento, aparecimento e desaparecimento de partículas.

Na parte (I) da figura, considerando a massa da partícula como propriedade de estado, o termo convectivo G , representa a taxa de crescimento ($G=dm/dt$), denominado crescimento por película.

Os termos B e D representados na parte (II) e (III) da figura, podem ser mais facilmente caracterizados definindo faixas ou intervalos onde eles serão aplicados, conforme mostrado na Figura 2.15.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
0,5M	1,0M	1,5M	2,0M	2,5M	3,0M	3,5M	4,0M	4,5M	5,0M

Figura 2.15 – Faixa e intervalos de massa de partícula.

Neste caso a faixa de massa de 0,5M a 5,0M foi dividida em X intervalos de 0,5M cada, quando as partículas de massa M se unem para gerar a partícula de massa $2M$ há um deslocamento da distribuição de massa na faixa da esquerda para direita. O termo B pode aqui ser caracterizado pelo aparecimento de uma partícula de massa $2M$ no intervalo IV da Figura 2.15 e o termo D decorrente do desaparecimento de duas partículas de massa M no intervalo II.

Considere agora a parte (III) da Figura 2.14, quando as partículas de massa M se chocam para gerar as quatro partículas de massa 0,5M, provocando o deslocamento da distribuição de massa na faixa da direita para a esquerda. O termo B pode aqui ser caracterizado pelo aparecimento das quatro partículas de massa 0,5M no intervalo I da Figura 2.15 e o termo D representa o desaparecimento de duas partículas de massa M do intervalo II.

Portanto, torna-se claro que tanto o termo B , quanto o termo D , podem envolver aglomeração ou fragmentação de partículas. A forma como estes eventos acontecem e se combinam em um determinado processo é que irá determinar a maior ou menor dificuldade da modelagem destes, assim como a maior ou menor complexidade das equações de previsão dos referidos efeitos.

Em um processo que envolve agregação de partículas, como por exemplo em peletização de partículas em tambor rotatório, assim como em vários outros processos típicos de engenharia, pode-se encontrar os três fenômenos descritos simultaneamente.

No trabalho de RAMKRISHNA (1985) o autor apresenta uma revisão envolvendo as várias aplicações das equações de modelo de balanço populacional, além de métodos estatísticos utilizados para desenvolver os termos de aglomeração, fragmentação e

crescimento da equação de balanço e ainda uma revisão dos métodos de solução analítica e numérica.

Um exemplo de aplicação de equação de modelo de balanço populacional, onde os termos B e D são nulos, é o trabalho de HIMMELBLAU e KENNETH (1967), cujo objetivo foi determinar a distribuição de tempo de residência de elementos de fluido em diferentes reatores, como mostra a Equação (2.4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(Nf(i_f)) + \frac{\partial}{\partial i_f}(GNf(i_f)) = \frac{1}{V}[Q_{entra}f(i_f)_{entra} - Q_{sai}f(i_f)_{sai}] \quad (2.4)$$

Neste caso, a propriedade de estado de interesse é a idade do elemento de fluido (α_i), sendo $G=d\alpha/dt$. Os termos $f(i_f)_{entra}$ e $f(i_f)_{sai}$ correspondem à distribuição de idade das correntes de entrada e saída do reator, respectivamente.

LIU e LISTER (1989) utilizaram o modelo de balanço populacional para representar a granulação de fertilizantes em tambor rotatório, conforme a Equação(2.5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(N(t)f(v_g, t)) = & \frac{1}{N(t)} \int_0^\infty \lambda_0(t) \lambda^*(v_g, v_g') N(t) f(v_g, t) N(t) f(v_g', t) dv_g' + \\ & + \frac{1}{2N(t)} \int_0^v \lambda_0(t) \lambda^*(v_g', v_g - v_g') N(t) f(v_g', t) N(t) f(v_g - v_g', t) dv_g' \end{aligned} \quad (2.5)$$

Neste caso a propriedade de estado analisada é o volume do grânulo v , a distribuição densidade de tamanho é dada por $N(t)f(v, t)$, $N(t)$ é o número total de partículas no tempo t , e $\lambda_0(t) \lambda^*(v, v')$ é a taxa de aglomeração de partículas.

HJORTSO e NIELSEN (1995) estudaram as oscilações provocadas em culturas microbiológicas devido a condições ambientais, bem como aos níveis de concentrações de substrato e do produto. Neste estudo os autores utilizaram a seguinte equação de modelo de balanço populacional:

$$\frac{\partial}{\partial t}(w) + \frac{\partial}{\partial i_c}(w) = (-r_{di} + \Gamma(i_c))w(t, i_c) \quad (2.6)$$

O termo $w(t, i_c)$ representa a distribuição de idade em um reator CSTR com taxa de diluição r_{di} , onde t é o tempo e (i_c) é a idade da célula, sendo esta a propriedade de estado estudada pelos autores. A função $\Gamma(i_c)$ diz respeito à probabilidade de uma célula se dividir.

Uma outra aplicação de modelo de balanço populacional que pode ser citada é o trabalho de KVALE et al (1996), onde foi desenvolvido um modelo dinâmico para estudar o fracionamento de microbolhas de gás em um processo de flotação. Neste trabalho a propriedade de estado foi o tamanho da bolha.

SEYSSIECQ et al (2000) estudaram o efeito da concentração de “sementes” na cinética de aglomeração de partículas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ em um cristalizador a volume constante de mistura perfeita. A equação de balanço utilizada no estudo é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega) + \frac{\partial}{\partial L}(G\omega) = a_g - f_r \quad (2.7)$$

Neste caso a propriedade de estado estudada foi o comprimento L das partículas, ω representa a função densidade numérica, G a taxa de crescimento linear, (a_g) a taxa de aglomeração e f_r a taxa de fragmentação.

Com base nos trabalhos citados anteriormente, fica claro a vasta aplicação de equações de balanço populacional na modelagem de diferentes processos. O princípio básico de todas estas equações é a equação da continuidade, mas para cada situação em particular esta equação apresenta uma configuração diferenciada. As propriedades de estado envolvidas nas equações são determinadas de acordo com a maior ou menor facilidade e precisão com que esta propriedade é medida. Um exemplo disso é o uso do comprimento L das partículas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ como propriedade de estado no trabalho de SEYSSIECQ et al (2000), como mostra a Equação (2.7). Certamente, a medida do comprimento foi julgada pelos autores como sendo a mais confiável e de fácil medição.

2.8.1 – Balanço Populacional Aplicado a Processos de Revestimento de Partículas

Em processos que envolvem o revestimento de partículas, as equações de modelos de balanço populacional geralmente são utilizadas com o objetivo de prever a distribuição de tamanho ou de massa das partículas, a partir de uma distribuição inicial conhecida e em condições pré-definidas. Como os processos de revestimento de partículas podem estar sujeitos a aglomeração, fragmentação ou crescimento por camada, o primeiro passo é determinar os mecanismos de crescimento envolvidos. Uma vez constatada a presença de fragmentação ou aglomeração, o passo seguinte é identificar a equação matemática que melhor descreve a taxa com que estes eventos acontecem e como estes se relacionam com a distribuição de massa ou tamanho de partículas.

KOLOGY et al (1966), estudaram o processo de peletização úmida em tambor rotatório utilizando areia como traçador para analisar os mecanismos envolvidos no crescimento dos peletes. Os autores concluíram que os principais mecanismos de crescimento são a aglomeração para partículas menores e o crescimento por película para partículas maiores.

LIU e LISTER (1989), estudaram a granulação de fertilizantes em tambor rotatório e constataram que neste processo os grânulos colidem e coalescem formando um grânulo maior. Estes grânulos inicialmente se mantêm unidos por forças de capilaridade e a medida em que vão secando são formadas pontes sólidas.

No revestimento de partículas em leito de jorro o mecanismo principal é o crescimento por camada. Segundo ROBINSON e WALDIE (1979), a taxa de crescimento linear de partículas é dependente do tamanho para um revestimento com spray localizado acima da região da fonte. Eles afirmaram que, como as partículas maiores possuem menor tempo de ciclo por percolarem mais rapidamente a região anular, elas passam parte do tempo perto da região do spray, recobrindo preferencialmente.

A maioria dos modelos descritos na literatura para revestimento em leito de jorro são baseados em crescimento linear e independente do tamanho. Um trabalho pioneiro onde os autores consideram o crescimento dependente do tamanho foi desenvolvido por LIU e LISTER (1992). Neste trabalho os autores estudaram a distribuição de massa de recobrimento de fertilizantes em três tipos de sementes, sendo que o modelo foi apresentado na forma proposta por RANDOLPH e LARSON (1971). Os resultados encontrados evidenciaram o efeito da distribuição inicial de tamanho das sementes na distribuição de massa de revestimento de fertilizante e os resultados da simulação apresentaram boas aproximações com os resultados experimentais.

A Equação utilizada por LIU e LISTER (1992), é apresentada na seqüência.

$$\frac{\partial}{\partial t}(Nf(m)) + \frac{\partial}{\partial m}(GNf(m)) = 0 \quad (2.8)$$

Neste caso os termos D e B são nulos, visto que no processo de revestimento de sementes em leito de jorro não há aglomeração ou fragmentação de partículas. O termo convectivo G é a variação da propriedade de estado, massa da partícula (m), com o tempo (dm/dt), que é justamente a taxa de crescimento de massa das sementes.

O presente trabalho adotou uma metodologia bem próxima a usada por LIU e LISTER (1992), tendo sido acrescentada uma modelagem estatística (Planejamento Composto Central

com uma equação de segunda ordem) para previsão da eficiência de revestimento de sementes de soja, nas condições estudadas.

Uma vez obtidos os resultados de simulação estes devem ser validados através da comparação com resultados obtidos experimentalmente. A execução dos experimentos deve seguir uma metodologia científica de planejamento e análise para que se tenha experimentos eficientes. Neste sentido, é apresentado na sequência um tópico sobre planejamento experimental.

2.9 – Planejamento Experimental

Um método científico de planejamento e análise deve ser seguido para que se tenha experimentos eficientes. Quando o problema envolve dados que podem conter erros experimentais, um modo adequado de análise é por métodos estatísticos. Em qualquer experimento há duas etapas: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados obtidos. Estas etapas estão intimamente ligadas, uma vez que o método a ser utilizado para análise depende diretamente do planejamento realizado.

O método univariado, onde o pesquisador altera uma variável enquanto as outras são mantidas constantes, é totalmente inviável nos casos em que se possui variáveis múltiplas, por exigir um número muito elevado de experimentos. Além disso, este método não permite uma análise sobre as possíveis interações entre as variáveis independentes.

Quando existem diversas possibilidades de combinação das variáveis relevantes ao processo, como no caso de recobrimento em leito de jorro, a análise dos experimentos é mais confiável utilizando técnicas estatísticas para esse fim. O planejamento fatorial dos experimentos (BOX et al., 1978) permite verificar a influência de efeitos individuais como também de interação entre as variáveis. A técnica de superfície de resposta proporciona o ajuste empírico de equações que relacionam as respostas obtidas em função de variáveis estudadas (MYERS, 1976).

O planejamento fatorial seleciona os níveis das variáveis estudadas e todas as combinações possíveis do experimento são determinadas. A determinação da quantidade de experimentos é feita de acordo com a quantidade de variáveis estudadas e com os níveis estipulados para essas variáveis. Um planejamento do tipo 2^k determina a quantidade de experimentos de um estudo em dois níveis com 'k' variáveis. Os planejamentos fatoriais a dois níveis são recomendados para sistemas cujas equações experimentais são de primeira

ordem. Quando um sistema for representado por equações de segunda ordem, ou seja, mais complexos, um planejamento fatorial com mais níveis, avaliados em cada fator, se faz necessário (BOX et al., 1978).

Uma desvantagem em utilizar o planejamento fatorial convencional para obter equações preditivas de segunda ordem é a quantidade excessiva de experimentos que devem ser realizados. Em planejamentos do tipo 3^k (3 níveis), para um estudo com 5 variáveis independentes seriam necessários 243 experimentos. Dependendo do tipo de estudo, a realização deste número de ensaios seria inviável. Com a necessidade de contornar esse problema, foi desenvolvido (BOX e WILSON, 1951) um método alternativo que fornece uma resposta equivalente a estes experimentos, porém com uma quantidade de experimentos menor. Esse método é denominado de planejamento composto central (**pcc**). O planejamento composto central nada mais é do que um planejamento fatorial de primeira ordem aumentado de pontos adicionais que permitem a estimação de parâmetros de segunda ordem. A quantidade de experimentos a serem realizados num planejamento composto central com 'k' variáveis é calculada a partir do planejamento fatorial a dois níveis (2^k), acrescido dos ensaios ou réplicas nos níveis centrais (n_c) e dos ensaios nos níveis extremos ($2k$). Os níveis das variáveis são determinados através da Equação (2.10) que mostra a codificação dos fatores que serão organizados em uma matriz de planejamento:

$$Varcod = \frac{\zeta_i - \zeta_0}{(\zeta_1 - \zeta_{-1}) / 2} \quad (2.9)$$

onde: *Varcod* é o valor da variável codificada, ζ_i o valor original ou não codificado, ζ_0 representa o valor original no nível central, ζ_1 é o valor original referente ao nível 1 e ζ_{-1} o valor original referente ao nível -1.

Os pontos adicionais do planejamento composto central são escolhidos pelo pesquisador. Esses pontos são os valores extremos de cada variável. Essa escolha deve ser feita de forma a deixar a matriz de variância e covariância diagonal (**pcc** ortogonal), o que elimina todas as correlações entre os parâmetros (MYERS, 1976).

A Tabela 2.2 apresenta a distribuição de 16 experimentos, envolvendo as variáveis independentes codificadas a dois níveis *Varcod*₁, *Varcod*₂ e *Varcod*₃, com duas réplicas no centro. A variável resposta é Y_i e α_0 e $-\alpha_0$, são respectivamente o nível superior e inferior de cada variável.

Tabela 2.2 – Matriz do planejamento composto central.

<i>Varcod</i> ₁	<i>Varcod</i> ₂	<i>Varcod</i> ₃	<i>Y</i> _{<i>i</i>}
1	1	1	<i>Y</i> ₁
-1	1	1	<i>Y</i> ₂
1	-1	1	<i>Y</i> ₃
-1	-1	1	<i>Y</i> ₄
1	1	-1	<i>Y</i> ₅
-1	1	-1	<i>Y</i> ₆
1	-1	-1	<i>Y</i> ₇
-1	-1	-1	<i>Y</i> ₈
0	0	0	<i>Y</i> ₉
0	0	0	<i>Y</i> ₁₀
α_o	0	0	<i>Y</i> ₁₁
$-\alpha_o$	0	0	<i>Y</i> ₁₂
0	α_o	0	<i>Y</i> ₁₃
0	$-\alpha_o$	0	<i>Y</i> ₁₄
0	0	α_o	<i>Y</i> ₁₅
0	0	$-\alpha_o$	<i>Y</i> ₁₆

O quadrado do coeficiente de correlação múltipla (R^2) avalia a porcentagem de variabilidade dos dados ajustados pela equação.

Através do método dos mínimos quadrados pode-se estimar os parâmetros β_{ij} da Equação (2.10). A análise de variância da regressão é feita com base no quadrado do coeficiente de correlação múltipla (R^2), com testes de hipótese usando as distribuições **F** de Fisher e **t** de Student.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.10)$$

O valor da distribuição **t de Student** é importante para o cálculo da significância dos parâmetros e é definido como a relação entre o valor do parâmetro estimado e o seu desvio padrão. O valor de **F** (Fisher) é determinado pela razão entre o quadrado médio da equação ajustada (QME) e o quadrado médio do resíduo (QMR), como mostra a Equação (2.11). Quanto maior o valor de **F**, melhor será o ajuste do modelo em questão.

$$F = \frac{QME}{QMR} \quad (2.11)$$

O quadrado médio da equação (QME) e o quadrado médio do resíduo (QMR), são dados pelas Equações (2.6) e (2.7) respectivamente.

$$QME = \frac{\text{Soma dos quadrados dos valores preditos}}{\text{Número de graus de liberdade da equação}} \quad (2.12)$$

$$QMR = \frac{\text{Soma dos quadrados do resíduo}}{\text{Número de graus de liberdade do resíduo}} \quad (2.13)$$

O número de graus de liberdade da equação é igual ao número de parâmetros da equação reduzido de um e o número de graus de liberdade do resíduo é obtido pela diferença entre o número total de experimentos e o número de parâmetros existentes na equação ajustada.

O valor estatístico de **F** é tabelado de acordo com o nível de significância e os graus de liberdade do resíduo e da equação. Mais detalhes sobre esta metodologia e valores tabelados de **F** podem ser encontrados na literatura específica como BOX et al (1978) e MYERS (1976).

Planejamentos fatoriais foram utilizados nesta tese na verificação dos dados de simulação fluidodinâmica por CFD, bem como no estudo de revestimento de sementes de soja.

CAPÍTULO III

ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO JORRO: MODELAGEM , SIMULAÇÃO E VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados:

- o modelo matemático usado no estudo da fluidodinâmica do leito de jorro;
- a verificação do modelo adotado;
- a metodologia experimental adotada para determinação da velocidade de partículas em leito de jorro bidimensional;
- o estudo da fluidodinâmica do leito de jorro com tubo draft para diferentes configurações;
- a determinação da curva característica de jorro simulada e a sua comparação com valores experimentais e valores obtidos por correlações da literatura;
- o estudo do formato do jorro e do diâmetro de jorro;
- a aplicação do modelo matemático na simulação de um leito de jorro cônico.

3.1 – Modelagem Multifásica

Os avanços computacionais em mecânica de fluidos promoveram as bases para maior discernimento da dinâmica de fluxos multifásicos. Existem duas aproximações para o cálculo dos fluxos multifásicos disponíveis no software FLUENT®: Euler-Lagrange e Euler-Euler. Conforme abordado anteriormente, neste trabalho foi adotada a aproximação Euler-Euler, abordada a seguir.

3.1.1 – Modelagem Euler-Euler

Na aproximação Euler-Euler, as diferentes fases são tratadas matematicamente como mutuamente contínuas. Desde que o volume de uma fase não possa ser ocupado por outras fases, o conceito de fração volumétrica da fase é introduzido. Estas frações volumétricas são consideradas como funções contínuas do espaço e do tempo e sua soma é igual a um. As

equações de conservação para cada fase são definidas para obter um conjunto de equações que têm estrutura similar para todas as fases. No caso de fluxos granulares as equações são obtidas através de informações empíricas e pela aplicação da teoria cinética dos gases.

No FLUENT[®], três diferentes modelos multifásicos Euler-Euler estão disponíveis: o modelo de volume de fluidos (VOF), o modelo de mistura e o modelo Euleriano.

3.1.1.1 – O Modelo de Volume de Fluidos (VOF)

O modelo VOF é uma técnica aplicada para malha Euleriana fixa. Este modelo é adequado a situações que envolvem dois ou mais fluidos imiscíveis onde a posição da interface entre a superfície dos fluidos é de interesse. No modelo VOF, um conjunto de equações de momento é partilhado pelos fluidos, e as frações volumétricas de cada fluido em cada célula computacional são calculadas em todo o domínio. As aplicações para o modelo VOF incluem fluxos estratificados, fluxos em superfícies livres, movimento de bolhas grandes, predição de dispersão de um jato (tensão superficial), e problemas estacionário ou transiente envolvendo interface líquido-gás.

3.1.1.2 – O Modelo de Mistura

O modelo de mistura é designado para duas ou mais fases (fluido ou partícula). Este modelo resolve equações de momento para a mistura e prescreve velocidades relativas para as fases dispersas. As aplicações para o modelo de mistura incluem arraste de partículas com baixo carregamento, fluxo de bolhas, sedimentação e ciclones. O modelo de mistura pode também ser usado no caso de fluxo multifásico homogêneo.

3.1.1.3 – O Modelo Euleriano

O modelo Euleriano é o mais complexo dos modelos multifásicos do FLUENT[®] (6.1.18). Ele resolve um conjunto, de equações que incluem as equações de momento e continuidade para cada fase. O agrupamento é executado através do coeficiente de pressão e troca na interface. A forma com que cada agrupamento é tratado depende dos tipos de fases envolvidas. Fluxos granulares (fluido-sólido) são tratados diferentemente de não granulares (fluido-fluido). A troca de momento entre as fases é também dependente do tipo de mistura modelada. As aplicações do modelo multifásico Euleriano incluem colunas de bolhas, suspensão de partículas e leitos fluidizados.

3.1.2 – Identificação do Modelo Multifásico Adequado ao Leito de Jorro

O primeiro passo para resolver qualquer problema multifásico é determinar qual dos regimes descritos melhor representa o fluxo desejado.

Em geral, uma vez determinado este regime de fluxo deve-se selecionar o modelo apropriado baseado em regras gerais citadas a seguir:

- Para bolhas, gotas e partículas arrastadas em que as frações volumétricas da fase dispersa são menores ou igual a 10%, usa-se o modelo de fase discreta.
- Para bolhas, gotas, e partículas arrastadas em que as frações volumétricas das fases misturadas ou dispersas excedem 10%, tanto o modelo de mistura como o modelo Euleriano são indicados.
- Para vazões baixas (“slug flow”), o modelo VOF é indicado.
- Para vazões em superfícies lisas ou estratificadas, o modelo VOF também é indicado.
- Para transporte pneumático, o modelo de mistura para fluxo homogêneo ou o modelo Euleriano para fluxo granular são indicados.
- Para leitos fluidizados o modelo Euleriano granular é a melhor indicação.
- Para *slurry flow* e transporte hidráulico, usar o modelo de mistura ou Euleriano.

Além dessas regras gerais outras considerações são importantes na escolha do modelo, sendo essas descritas a seguir.

3.1.2.1 – Linhas de Direção Detalhadas

O carregamento de partículas (C_a) tem um importante impacto nas interações entre as fases. Este parâmetro é definido como a razão entre a densidade de massa da fase dispersa (ρ_d) e a da fase contínua (ρ_c):

$$C_a = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (3.1)$$

onde: α_c e α_d representam as frações volumétricas das fases contínua e dispersa, respectivamente.

A razão de densidade de material:

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (3.2)$$

é maior que 1000 para vazões gás-sólido, por volta de 1 para líquido-sólido, e menor que 0.0001 para vazões gás-líquido.

Usando estes parâmetros é possível estimar a distância média entre as partículas individuais da fase particulada. Uma estimativa desta distância pode ser obtida através da equação abaixo.

$$\frac{L}{d_d} = \left(\frac{\pi}{6} \frac{1+k}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

onde $k = C_a/\gamma$. A informação sobre estes parâmetros é importante para determinar como a fase dispersa deve ser tratada. Por exemplo, para fluxo gás-partícula com o carregamento de partícula de 1, o espaço entre partículas L/d_d é por volta de 8 e a partícula pode então ser tratada como isolada.

Dependendo do carregamento de partículas o grau de interação entre as fases pode ser dividido entre três categorias:

- Para carregamento muito baixo, o acoplamento entre as fases é de um caminho, i.e., o fluido influencia as partículas através do arraste e turbulência, mas as partículas não têm influência sobre o fluido. Os modelos de fase discreta, de mistura e Euleriano podem todos tratar deste tipo de problema corretamente. Considerando que o modelo Euleriano é o que demanda o maior esforço computacional, o modelo de fase discreta ou de mistura é recomendado.
- Para carregamento intermediário, o acoplamento é de dois caminhos, i.e., o fluido influencia a fase particulada através de arraste e turbulência, e as partículas, por sua vez, influenciam o fluido através da redução na média do momento e turbulência. Os modelos de fase discreta, de mistura e Euleriano podem ser aplicados neste caso, mas é preciso levar em conta outros fatores a fim de decidir qual modelo é mais apropriado.
- Para carregamento alto, existe o acoplamento de dois caminhos mais a pressão e tensão viscosa devido às partículas (acoplamento de quatro caminhos). Apenas o modelo Euleriano irá tratar este tipo de problema corretamente.

Para sistemas com carregamento de partículas intermediário, a estimativa do valor do número de Stokes pode ajudar a selecionar o melhor modelo. O número de Stokes pode ser definido como a relação entre o tempo de resposta da partícula T_d e o tempo de resposta do sistema t_s :

$$S_t = \frac{T_d}{t_s} \quad (3.4)$$

onde $T_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_c}$, sendo ρ_d , μ_c e d_d respectivamente densidade, viscosidade e diâmetro da partícula. O termo t_s é baseado na largura característica (L_s) e velocidade característica (v_s) do sistema sob investigação: $t_s = L_s/v_s$.

Para $S_t < 1$, a partícula irá seguir aproximadamente o fluxo e qualquer um dos três modelos (fase discreta, mistura ou Euleriano) é aplicável, podendo então ser escolhido aquele que exige o menor esforço computacional (modelo de mistura, na maioria dos casos), ou o mais apropriado considerando outros fatores. Para $S_t > 1$, as partículas moverão independentemente do fluxo, não sendo indicado o modelo de fase discreta. Para $S_t \approx 1$, novamente qualquer um dos três modelos é aplicável, podendo ser escolhido o menos “caro” computacionalmente ou o mais apropriado considerando outros fatores.

Com base no conteúdo apresentado nos itens 3.1 a 3.1.3.1 concluiu-se que o modelo Euler-Euler Euleriano é o mais adequado para modelagem do leito de jorro. Para o caso de um leito com a concentração de partículas elevada, como é o caso do leito de jorro, informações como temperatura granular e pressão de sólidos também não podem ser desprezadas. Isto posto, optou-se pelo modelo Euler-Euler Euleriano Granular Multifásico.

O início dos estudos de simulação se dá com a criação da malha a qual exige experiência e perícia. O tópico a seguir mostra os principais passos usados na obtenção e tratamento de uma malha computacional.

3.2 – Etapa de Pré-Processamento

A malha computacional foi obtida utilizando o “software” de construção de malha Gambit. Este “software” disponibiliza uma interface com o FLUENT® e disponibiliza recursos que permitem a elaboração de malhas com diferentes graus de sofisticação. As etapas de pré-processamento seguem a sequência abaixo relacionada:

1. Construção da geometria do equipamento;
2. Definição das faces e/ou volumes;
3. Determinação de efeitos como camada limite ou outro tipo de refinamento desejado;

4. Aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetrahédrica, hexahédrica ou híbrida);
5. Definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
6. Determinação das fases que compõem o interior do equipamento, por exemplo fluido (ar) e/ou sólido (sementes de soja, esfera de vidro, etc...);
7. Conversão do arquivo (com extensão .msh do Gambit) contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo software FLUENT® (extensão .cas);
8. 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.

Neste trabalho, em um primeiro momento foi obtida uma malha “grosseira”, visto que o método de volumes finitos gera resultados fisicamente coerentes mesmo com o uso de malhas não refinadas. Uma vez obtido o resultado e identificados os modelos adequados para simular a fluidodinâmica de um leito de jorro, foram feitos refinamentos localizados da malha nas interfaces entre as fases e na região de jorro. A Figura 3.1 mostra uma malha refinada do leito de jorro.

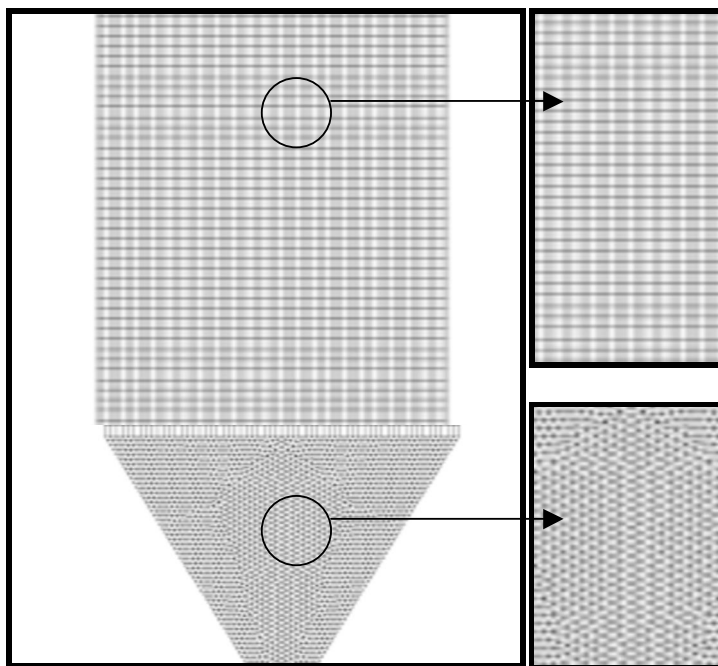


Figura 3.1 – Malha refinada aplicada ao leito de jorro

Neste trabalho foram testadas várias configurações para a malha e os pontos chave avaliados foram a geometria e tamanho da célula e os tipos e regiões de refinamento. Um aspecto fundamental nesta etapa é garantir que o tamanho da célula jamais seja inferior ao tamanho da partícula. Caso seja adotada uma malha com células de tamanho inferior ao tamanho das partículas, a simulação não irá divergir em função disto, porém os resultados obtidos provavelmente não serão muito coerentes. Neste sentido, independente da simulação realizada optou-se por usar um tamanho de célula da malha com no mínimo 5% acima do diâmetro da partícula. A Figura 3.1 mostra uma malha refinada do leito de jorro.

Outro ponto importante na construção da malha no caso do leito de jorro é adotar malha não estruturada com células triangulares na parte cônica e malha estruturada com células retangulares na parte cilíndrica. Com isto pôde-se obter resultados mais coerentes e aumentar inclusive a velocidade de convergência durante a simulação.

Na seqüência é apresentado o desenvolvimento do modelo matemático (Granular Euleriano Multifásico) adotado nas simulações da fluidodinâmica do leito de jorro.

3.3 – O Modelo Euleriano Granular Multifásico Aplicado ao Leito de Jorro

Neste item, o modelo Euleriano Granular Multifásico com suas equações conservativas e constitutivas pertinentes são apresentadas.

Como citado anteriormente, o leito de jorro pode ser dividido em três regiões: a região de jorro na parte central do leito, onde a concentração de partículas é baixa, a região anular entre o jorro e a parede, onde a concentração de partículas é próxima à de um leito empacotado e a região da fonte com uma concentração de partículas bem inferior à de um leito empacotado. A fração de volume representa o espaço ocupado por cada fase e as leis de conservação de massa e momentum devem ser satisfeitas para cada fase individualmente.

Sendo assim, a descrição do fluxo multifásico incorpora as frações volumétricas de cada fase, denotadas aqui como α_y (o subscrito y representa tanto a fase fluida(q) quanto a fase sólida(p)). A obtenção da equação de conservação pode ser feita pelo agrupamento médio do balanço local instantâneo para cada uma das fases ou pelo uso da teoria de mistura.

O volume da fase y , V_y , é definido por:

$$V_y = \int_V \alpha_y dV \quad (3.5)$$

onde:

$$\sum_{y=1}^n \alpha_y = 1 \quad (3.6)$$

A densidade efetiva da fase y é:

$$\bar{\rho}_y = \alpha_y \rho_y \quad (3.7)$$

onde ρ_y é a densidade da fase y .

Equação da continuidade para a fase fluida q :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla g(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (3.8)$$

Equação da continuidade para a fase sólida p :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla g(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{q=1}^n \dot{m}_{qp} \quad (3.9)$$

onde $\vec{v}_q$ e $\vec{v}_p$ são as velocidades das fases q e p , respectivamente. O termo $\dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp}$ caracteriza a transferência de massa da $p^{\text{ésima}}$ para $q^{\text{ésima}}$ fase e n o número de fases (no caso de leito de jorro duas fases, uma fluida e uma sólida). No presente estudo foram considerados nulos os termos do lado direito das Equações (3.8 e 3.9), ou seja, adotou-se nula a transferência de massa entre as fases.

Como os modelos do tipo Euler-Euler, como é o caso do modelo Granular Euleriano Multifásico, consideram a fase fluida contínua (ou primária) e a fase sólida dispersa (ou secundária) a notação q expressa nas equações referidas nesta seção deverá ser entendida como representativa da fase primária, enquanto p da secundária. Portanto, neste trabalho foi considerada a fase sólida secundária (p) e a fase gasosa como primária (q).

Balanço de momento para a fase fluida q :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\vec{\tau}}_q + \sum_{p=1}^n (\bar{\vec{R}}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\bar{\vec{F}}_{co} + \bar{\vec{F}}_{lift,q} + \bar{\vec{F}}_{vm,q}) \quad (3.10)$$

Balanço de momento para a fase sólida p :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p) = & -\alpha_p \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\vec{\tau}}_p + \\ & \alpha_p \rho_p (\bar{\vec{F}}_{co} + \bar{\vec{F}}_{lift,p} + \bar{\vec{F}}_{vm,p}) + \sum_{l=1}^N (K_{qp} (\vec{v}_q - \vec{v}_p) + \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Sendo que: $\bar{\vec{F}}_{co}$ é a força externa do corpo, $\bar{\vec{F}}_{lift}$ é a força de ascensão, $\bar{\vec{F}}_{vm}$ é a força de massa virtual, $\bar{\vec{R}}_{pq}$ é a força de interação entre as fases e p é a pressão distribuída em todas as

fases. O termo $\bar{\bar{\tau}}_q$ da Equação (3.10) representa o tensor de deformação da fase fluida q , dado por.

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \bar{\mathbf{v}}_q + \nabla \bar{\mathbf{v}}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_q \bar{\bar{\mathbf{I}}} \quad (3.12)$$

onde μ_q e λ_q são a viscosidade de cisalhamento e a viscosidade *bulk* da fase q respectivamente. A Equação (3.10) deve considerar para o cálculo da força na interface ($\bar{\mathbf{R}}_{pq}$), as características do leito como porosidades distintas em regiões distintas do leito, tipo de atrito, pressão, coesão e outros efeitos, estando sujeita à seguinte condição: $\bar{\mathbf{R}}_{pq} = -\bar{\mathbf{R}}_{qp}$ e $\bar{\mathbf{R}}_{qq} = 0$.

O termo de interação entre as fases é expresso pela Equação (3.13):

$$\sum_{p=1}^n \bar{\mathbf{R}}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\bar{\mathbf{v}}_p - \bar{\mathbf{v}}_q) \quad (3.13)$$

onde $K_{pq} = K_{qp}$ é o coeficiente de troca de momento na interface.

Forças de Ascensão

A força de ascensão que age na fase secundária p e na fase primária q é calculada através da equação abaixo:

$$\bar{\mathbf{F}}_{lift} = -0,5 \rho_q \alpha_p (\bar{\mathbf{v}}_q - \bar{\mathbf{v}}_p) \times (\nabla \bar{\mathbf{v}}_q) \quad (3.14)$$

Esta força de ascensão atua sobre as partículas devido aos gradientes de velocidade na fase primária, sendo mais significativa para partículas maiores e não empacotadas. Neste caso, ocorre uma rápida separação entre as fases. A força de ascensão ($\bar{\mathbf{F}}_{lift}$) será adicionada no lado direito da equação de momento para ambas as fases (sendo: $\bar{\mathbf{F}}_{lift,q} = -\bar{\mathbf{F}}_{lift,p}$).

Na maioria dos casos, inclusive no presente trabalho, a força de ascensão é insignificante comparada à força de arraste. A força de ascensão e o coeficiente de ascensão podem ser especificados para cada par de fases, se desejado.

Força Mássica Virtual

Para fluxos multifásicos, é possível ainda incluir o efeito da força mássica virtual ($\bar{\mathbf{F}}_{vm,q}$) que ocorre quando a fase secundária p acelera em relação à fase primária q . A inércia devido à

massa da fase primária gera um termo chamado força mássica virtual definida pela Equação (3.15):

$$\vec{F}_{vm,q} = 0,5\alpha_p\rho_q\left(\frac{d_q\vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p\vec{v}_p}{dt}\right) \quad (3.15)$$

O efeito da força mássica virtual é significativo quando a densidade da fase secundária é muito menor que a densidade da fase primária (em coluna de bolha por exemplo), o que não acontece no caso do leito de jorro, onde a densidade da fase secundária (partícula) é muito maior que a da primária (ar). A força de ascensão $\vec{F}_{vm}$ será adicionada no lado direito da equação de momento para ambas as fases (sendo: $\vec{F}_{vm,q} = -\vec{F}_{vm,p}$).

Isto posto, verifica-se que os termos $\vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}$, são desprezíveis no caso de um leito de jorro o que simplifica a Equação (3.10).

Modelos de arraste

A troca de momento entre as fases, é baseada no coeficiente de troca fluido-sólido K_{qp} .

Coeficiente de Troca Fluido(q)-Sólido(p)

Como mencionado anteriormente, o leito de jorro deve ser modelado como um sistema bifásico, com uma fase fluida (ar) e outra sólida (partículas). Para esta situação o coeficiente de troca sólido- fluido, K_{pq} pode ser escrito da seguinte forma geral:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_p\rho_p f}{\tau_p} \quad (3.16)$$

onde f é definido de forma distinta para os diferentes modelos de coeficiente de troca (como descrito na seqüência), e τ_p , o tempo de relaxação da partícula, é definido como:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (3.17)$$

onde d_p é o diâmetro das partículas (fase sólida).

Todas as definições de f incluem o coeficiente de arraste (C_D) que é baseada no número de Reynolds relativo (Re_s). Este coeficiente de arraste difere entre os modelos de coeficientes de troca disponíveis na literatura, a seguir é apresentado o modelo de GIDASPOW (1992), o qual foi adotado no presente trabalho.

Modelo de GIDASPOW et al (1992)

Este modelo é uma combinação do modelo de WEN e YU (1966) (para fase diluída) e a equação de ERGUN (1952) (para a fase densa). Quando $\alpha_q > 0,8$, o coeficiente de troca fluido-sólido K_{pq} é da seguinte forma:

$$K_{pq} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_p \alpha_q \rho_q |v_p - v_q|}{d_p} \alpha_q^{-2,65} \quad (3.18)$$

onde

$$C_D = \frac{24}{\alpha_q Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_q Re_s)^{0,687} \right] \quad (3.19)$$

Quando $\alpha_f \leq 0,8$,

$$K_{pq} = 150 \frac{\alpha_p (1 - \alpha_q) \mu_q}{\alpha_q d_p^2} + 1,75 \frac{\rho_q \alpha_p |\vec{v}_p - \vec{v}_q|}{d_p} \quad (3.20)$$

Para o leito de jorro este modelo mostrou ser o mais apropriado, devido à diferença de concentração de partículas existentes nas regiões características do leito de jorro.

Como mencionado no capítulo 2, a modelagem matemática de um sistema como o leito de jorro requer a aplicação da teoria de fluxos granulares, sendo esta apresentada nos tópicos a seguir.

Equações de Fluxo Granular e Teoria Cinética

Um modelo multi-fluido granular é adotado para descrever o comportamento do fluxo em uma mistura fluido-sólido. As tensões da fase sólida são obtidas por analogia entre o movimento aleatório das partículas, devido às colisões entre as mesmas, e o movimento de moléculas de gás, levando em conta a não elasticidade da fase granular. A energia cinética associada às flutuações da velocidade da partícula é representada pela temperatura granular que é proporcional à metade do quadrado da velocidade das partículas.

Pressão de Sólidos

Para fluxos granulares em regime compressível (i.e., quando a fração volumétrica de sólidos é menor que o máximo valor permitido, que é a porosidade na condição de leito fixo),

a pressão de sólidos é calculada e usada para o termo gradiente de pressão, ∇p_s , na equação de momento para fase granular. Como existe uma distribuição de velocidade para as partículas, um parâmetro denominado de temperatura granular é introduzido ao modelo, e aparece na expressão para pressão de sólidos e viscosidades. A temperatura granular é uma medida da variação da energia cinética das partículas devido aos choques entre as mesmas.

A pressão de sólidos é composta de um termo cinético e um segundo termo para colisões entre partículas:

$$p_s = \alpha_p \rho_p \theta_s + 2\rho_p (1 + e_{ss}) \alpha_p^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.21)$$

onde e_{ss} é o coeficiente de restituição para colisões entre partículas, $g_{0,ss}$ é a função de distribuição radial, e θ_s é a temperatura granular. Neste trabalho adotou-se um valor de 0,9 para e_{ss} , o qual é usualmente encontrado na literatura, mas o valor pode ser ajustado para se adaptar a um determinado tipo de partícula. A temperatura granular, θ_s , é proporcional à energia cinética da partícula, e será descrita nesta seção.

A função $g_{0,ss}$ é uma função de distribuição que governa a transição da condição de compressibilidade ($\alpha < \alpha_{p,max}$) onde o espaço entre as partículas sólidas pode continuar a diminuir, para a condição de incompressibilidade com $\alpha = \alpha_{p,max}$, onde não pode ocorrer mais diminuição no espaço vazio.

Função de Distribuição Radial

A função de distribuição radial, g_0 , é o fator de correção que modifica a probabilidade de colisão entre os grãos quando a fase granular sólida se torna densa. Esta função pode ser interpretada como a distância não dimensional entre esferas:

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (3.22)$$

onde s é a distância entre as partículas.

Da Equação (3.22) pode ser observado que nas condições onde a fase sólida é diluída então $s \rightarrow \infty$, conseqüentemente $g_0 \rightarrow 1$. No limite quando a fase sólida está compacta, $s \rightarrow 0$ e $g_0 \rightarrow \infty$. A função de distribuição radial (g_0) está intimamente conectada ao fator X da teoria de não uniformidade de gases de CHAPMAN e COWLING (1990). X é igual a 1 para gases rarefeitos, e aumenta tendendo a infinito quando as moléculas estão tão perto que o movimento não é possível.

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_{p,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.23)$$

Tensão de Sólidos

A equação de momentum para a fase sólida requer ainda a descrição da tensão da fase sólida. A teoria cinética granular desenvolvida por LUN *et al.* (1984) é adotada neste estudo. O tensor tensão de sólidos contém as viscosidades devido ao cisalhamento e bulk e surge devido à troca de momento por translação e colisão das partículas. Um componente de atrito da viscosidade pode também ser incluído para considerar a transição visco-plástica que ocorre quando partículas de sólido alcançam a fração volumétrica máxima.

Viscosidade de Cisalhamento

A viscosidade de cisalhamento é obtida da soma das componentes colisional, cinética e friccional, conforme descrito na Equação (3.24).

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.24)$$

Os termos da equação acima são comentados na seqüência.

Viscosidade Devido à Colisão entre as Partículas

A parte da viscosidade de cisalhamento devido às colisões entre as partículas é dada por:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_p \rho_p d_p g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

Viscosidade Cinética

O modelo de viscosidade cinética adotado foi o modelo de SYAMLAL *et al.* (1989).

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_p d_p \rho_p \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_p g_{0,ss} \right] \quad (3.26)$$

Viscosidade Devido ao Atrito

Em fluxos densos a baixa tensão, onde a fração volumétrica secundária para uma fase sólida aproxima-se do limite de empacotamento, a geração da tensão é principalmente devida

ao atrito ou fricção entre as partículas. Neste caso o seguinte parâmetro, conhecido como viscosidade por atrito, pode ser incluído no cálculo:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \beta^o}{2\sqrt{\bar{\bar{I}}_{2D}}} \quad (3.27)$$

onde p_s é a pressão de sólidos, β^o é o ângulo interno de atrito e $\bar{\bar{I}}_{2D}$ é o segundo invariante do tensor taxa de deformação.

Viscosidade Bulk

O parâmetro conhecido como *viscosidade bulk* de sólidos é um parâmetro responsável pela resistência à compressão e expansão das partículas granulares. A expressão de LUN *et al.* (1984) dada pela Equação (3.28) foi adotada neste caso.

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_p \rho_p d_p g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.28)$$

Temperatura Granular

Assim como para gases tem-se a temperatura termodinâmica, pode se introduzir o conceito de temperatura granular (θ_s) para sistemas particulados como uma medida da flutuação da velocidade das partículas.

$$\theta_s = \frac{1}{3} (v_p^2) \quad (3.29)$$

A temperatura granular para a fase sólida é proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas. A equação do transporte obtida da teoria cinética tem a forma:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p \alpha_p \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_p \alpha_p \vec{v}_p \theta_s) \right] = (-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}) : \nabla \vec{v}_p + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{qp} \quad (3.30)$$

onde:

$(-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}) : \nabla \vec{v}_p$ = geração de energia pelo tensor de tensão de sólido

$k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ = energia de difusão (k_{θ_s} é o coeficiente de difusão)

γ_{θ_s} = energia de dissipação devido à colisão

ϕ_{qp} = troca de energia entre a fase fluida e a fase sólida.

O modelo de GIDASPOW et al (1992) foi adotado no cálculo do coeficiente de difusão de temperatura granular:

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_p d_p \sqrt{(\theta \pi)}}{384 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \rho_p \alpha_p^2 d_p (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.31)$$

A dissipação de energia pela colisão, γ_{θ_s} , representa a taxa de energia dissipada por colisões entre partículas da fase sólida. Este termo é representado pela Equação (3.32).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12 (1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_p \sqrt{\pi}} \rho_p \alpha_p^2 \theta_s^{3/2} \quad (3.32)$$

A transferência de energia cinética das flutuações aleatórias na velocidade da partícula da fase sólida para fase fluida é representada por ϕ_{qp} :

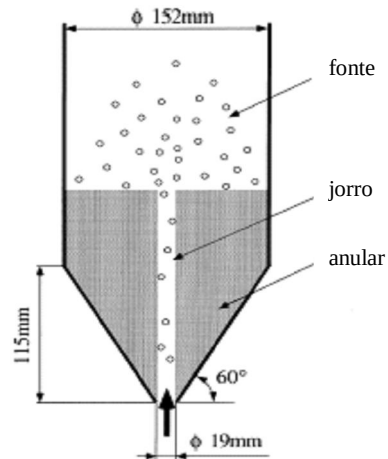
$$\phi_{qp} = -3k_{qp} \theta_s \quad (3.33)$$

Uma vez descrito o modelo Euleriano Granular, a seguir será apresentada uma aplicação do referido modelo ao leito de jorro, tendo em vista as condições experimentais estudadas por HE *et al.* (1994). A comparação entre os valores obtidos por simulação e os valores experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) foi realizada visando a verificação preliminar do modelo e da metodologia adotada.

3.4 – Verificação do Modelo Euleriano Granular Multifásico

3.4.1 – Comparação com os Resultados Experimentais de HE *et al.* (1994)

A verificação do modelo Euleriano granular, descrito anteriormente, usado na simulação da fluidodinâmica do leito de jorro foi feita inicialmente confrontando os resultados simulados com os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994). Estes autores utilizaram um leito de jorro com a geometria mostrada na Figura 3.2, onde estão indicadas as regiões características do equipamento: anular, de jorro e fonte. O trabalho de HE *et al.* (1994) é uma importante referência devido à confiabilidade das técnicas de medida utilizadas pelos autores.

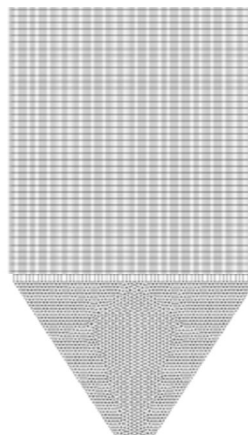
Figura 3.2 – Geometria do leito, He *et al.* (1994)

As condições experimentais usadas por HE *et al.* (1994) estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Condições experimentais usadas por He *et al.* (1994)

Diâmetro da partícula, d_s	1,41 mm
Densidade da partícula, ρ_s	2503 Kg/m ³
Porosidade do leito estático, ε_s	0,412
Altura do leito estático	0,325 m
Fluido	Ar a 20°C

O perfil de velocidade usado nesta simulação foi correspondente a 10% acima da condição de jorro mínimo, ou seja, $U=1,1U_{ms}$. Para esta condição de vazão obteve-se a mesma altura de fonte obtida no trabalho experimental de HE *et al.* (1994), sendo esta igual a 15 cm. A malha usada é apresentada na Figura 3.3, esta malha é triangular (não estruturada) na parte cônica e hexaédrica (estruturada) na parte cilíndrica. O total de células da malha foi de 6862.

Figura 3.3 – Malha adotada para o leito (He *et al.* (1994)).

O perfis da fração de volume de sólidos obtido por simulação é mostrado na Figura 3.4.

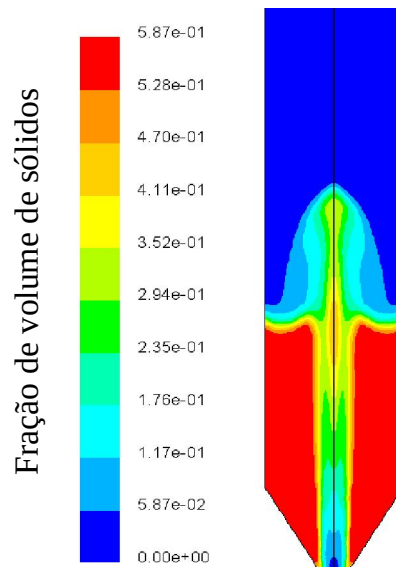


Figura 3.4 – Fração de volume de sólidos simulado para as condições de He *et al.* (1994).

Nesta figura é possível distinguir as três diferentes regiões do leito de jorro: região anular, de jorro e fonte. Na região anular a fração de sólidos é praticamente constante.

Perfis radiais de velocidades verticais das partículas no leito são apresentados nas figuras a seguir. Os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) são apresentados na Figura 3.5 e os resultados obtidos por simulação, conforme metodologia definida anteriormente, podem ser vistos na Figura 3.6. Nestas figuras, z refere-se à altura do leito a partir da base.

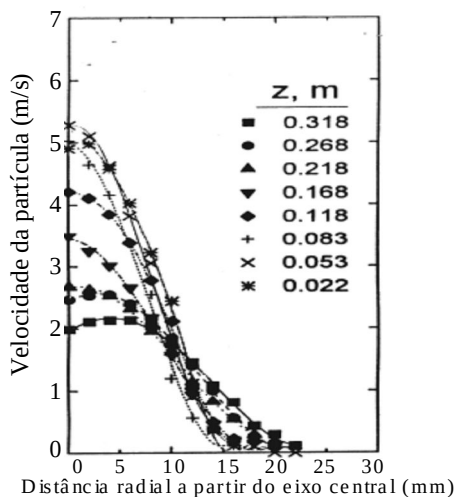


Figura 3.5 – Distribuição de velocidade radial, das partículas resultados experimentais de HE *et al.* (1994).

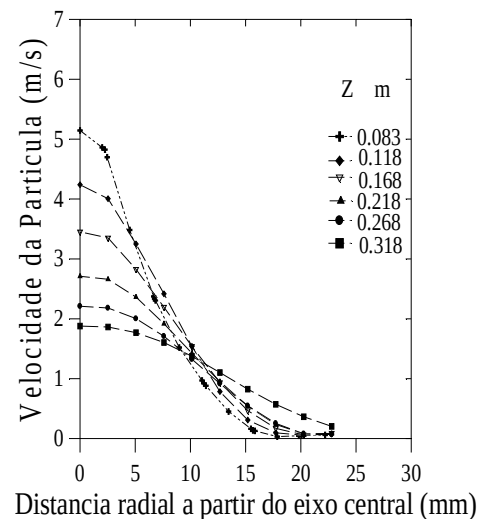


Figura 3.6 – Distribuição de velocidade radial, das partículas resultados obtidos por simulação.

Observa-se nos resultados apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6, que as velocidades locais das partículas na região central do jorro aumentam próximo da entrada e então decrescem com a altura. A velocidade também decresce com o incremento da distância radial.

Os perfis simulados de velocidade podem ser analisados conforme a região radial, cujo raio r é medido a partir do eixo central. Sejam as seguintes regiões: região R1 onde, $0 \leq r \leq 11$ mm e região R2, $11 \leq r \leq 22$ mm. Na região R1, a velocidade diminui com o aumento da altura no leito, medida a partir da base (z) para $0,118 \leq z \leq 0,318$. Na região R2, ocorre uma inversão deste comportamento inclusive para o menor valor de z (0,083). Em ambas regiões a velocidade da partícula diminui com o raio r .

Os resultados simulados mostram uma boa concordância com os resultados experimentais de HE et. al. (1994), tanto em relação à inversão de comportamento descrito anteriormente, como aos valores obtidos.

As Figuras 3.7 (a) apresenta o mapa de vetores de velocidade dos sólidos para a região cônica obtidos na simulação. A partir da Figura 3.7 (b) observa-se a movimentação característica das partículas no leito de jorro, ou seja, ascendente na região de jorro e descendente na região anular, com vetores de velocidade pequenos no sentido descendente (indicando um menor valor do módulo da velocidade naquela direção e sentido) e maiores no sentido ascendente (indicando um maior valor do módulo da velocidade naquela direção e sentido). Nota-se ainda que os vetores velocidade de partículas são pequenos próximo à parede, aumentam à medida em que se afastam das mesmas e que próximo à base são maiores e decrescem com o aumento da distância da base.

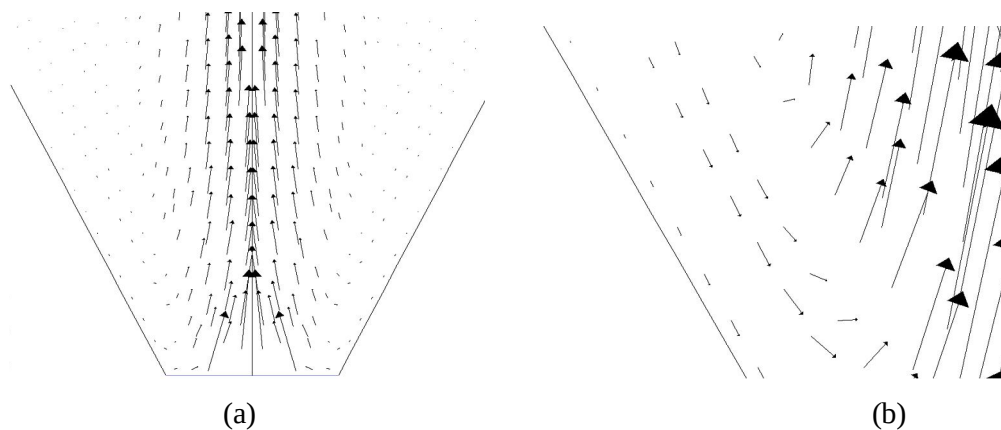


Figura 3.7 – Mapa de vetor velocidade de sólidos na região cônica.

Perfis radiais de porosidade na região de jorro são apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9.

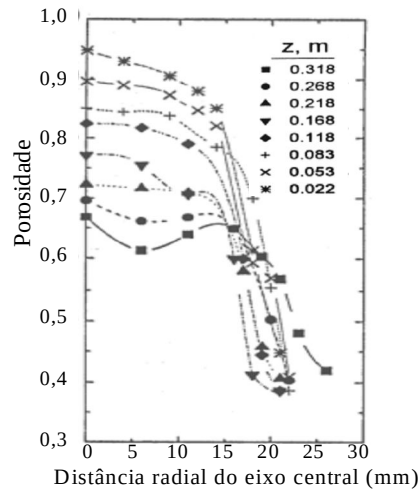


Figura 3.8 – Distribuição radial de porosidade (região de jorro), resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994).

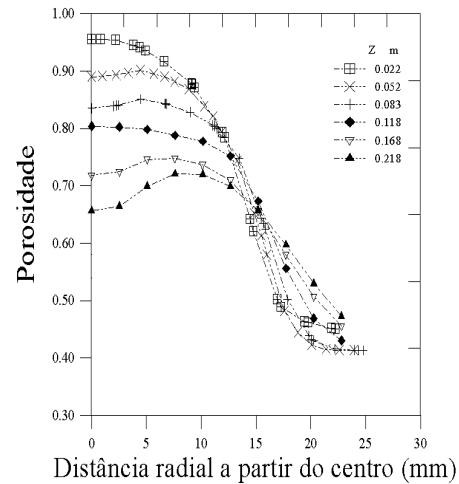


Figura 3.9 – Distribuição radial de porosidade simulada na região de jorro.

A Figura 3.8 apresenta os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) e a Figura 3.9 os valores simulados. A porosidade local decresce com a altura e com a distância radial. Os resultados das Figuras 3.8 e 3.9 revelam novamente uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados.

Perfis de porosidade na região anular também foram estudados e estão apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11. A Figura 3.10 representa o resultado experimental obtido por HE *et al.* (1994) e a Figura 3.11 mostra os valores simulados obtidos neste trabalho.

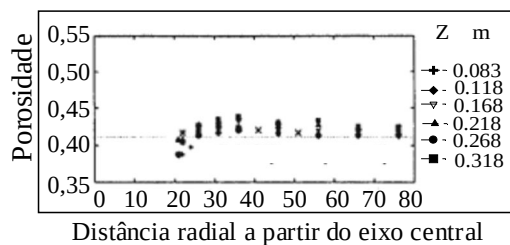


Figura 3.10 – Distribuição radial de porosidade (região de anular), resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994).

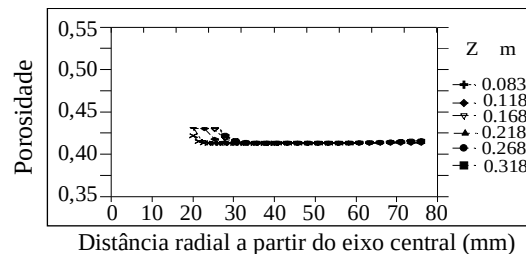


Figura 3.11 – Distribuição radial de porosidade simulada na região anular.

A Figura 3.10 mostra que existe uma região anular com maior densidade de partículas próxima à interface com o jorro, na qual a porosidade é um pouco menor que a de um leito empacotado. Isto se deve às força de arraste que atua nesta região, à massa de partículas na região anular, à tensão cisalhante causada pelo gás e pelo movimento ascendente das

partículas no jorro e à tensão cisalhante devido ao movimento descendente das partículas na região anular.

O mesmo comportamento qualitativo e quantitativo foi observado nas Figuras 3.10 e 3.11, demonstrando uma boa concordância entre os resultados experimentais de HE *et al.* (1994) e os resultados simulados.

Com base nos resultados obtidos nas simulações do leito de jorro para as condições de HE *et al.* (1994) pôde-se concluir que o modelo adotado representa bem o fenômeno físico real. Assim, foi possível dar seqüência ao estudo da fluidodinâmica do leito de jorro adotando a metodologia de resolução numérica proposta.

Uma vez realizada a verificação do modelo com os resultados de HE *et al.* (1994), foram feitas medidas experimentais de velocidade de partículas em um leito de jorro bidimensional com tubo draft. Estas medidas também serviram como complemento de verificação do modelo, com o leito em uma configuração não convencional.

3.4.2 – Comparação das Simulações com Resultados Experimentais Obtidos em um Leito de Jorro Bidimensional

3.4.2.1 – Descrição do Aparato Experimental

Para as medidas experimentais da velocidade das partículas de sementes de soja, com densidade de 1173 Kg/m^3 e diâmetro característico (diâmetro da esfera de igual volume) de 6 mm, imagens das partículas em movimento foram gravadas usando uma câmera de alta velocidade (velocidade mínima 250 quadros/segundo e máxima 2000 quadros/segundo). A distância era medida através das marcações feitas na parede de acrílico do leito e o tempo era determinado com base no número de quadros executados no referido percurso. A unidade experimental utilizada é aquela apresentada na Figura 4.3 substituindo o leito de jorro cilíndrico por um leito bidimensional com a geometria mostrada na Figura 3.12. A velocidade média do ar na entrada do leito foi de 65 m/s. A altura do leito estático foi de 21 cm.

A Figura 3.13 mostra uma fotografia do leito de jorro bidimensional em acrílico. A Figura 3.14 mostra uma imagem típica obtida com a câmera de alta velocidade com uma gravação de 500 quadros por segundo, sendo esta a velocidade adotada na região anular. Para a região de jorro foi necessário adotar a velocidade máxima da câmera, ou seja, 2000 quadros por segundo. Para obtenção de imagens com altas velocidades de gravação foi necessário usar 3 lâmpadas de 1500 W, sendo duas nas laterais do leito e uma frontal. Nestes experimentos foi utilizado um tubo draft.

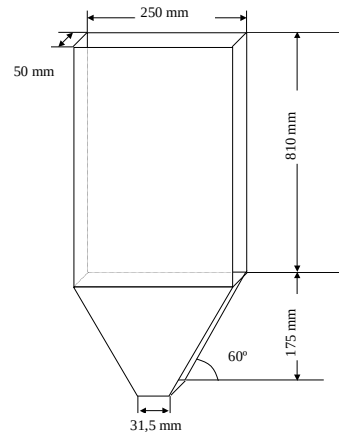


Figura 3.12 – Geometria do leito de jorro bidimensional

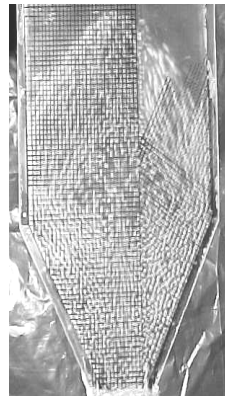


Figura 3.13 – O leito de jorro bidimensional

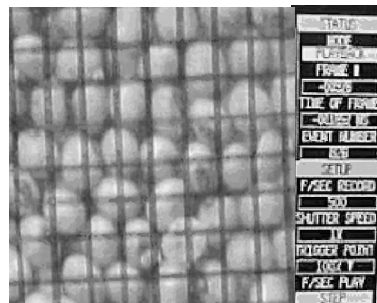


Figura 3.14 – Imagem do leito de jorro bidimensional obtida com a câmera de alta velocidade

3.4.2.2 – Comparação entre Resultados Experimentais e Simulados

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram os resultados experimentais e simulados para a velocidade das partículas (sementes de soja) nas regiões de jorro e anular, respectivamente, para diferentes alturas no interior do leito de jorro bidimensional com tubo draft. Nota-se uma boa concordância entre os valores simulados e experimentais nas duas regiões estudadas.

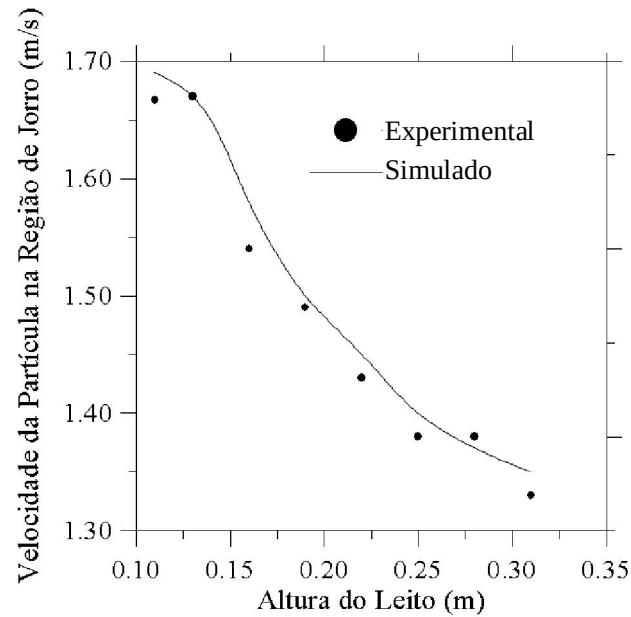


Figura 3.15 – Perfil de velocidade axial da partícula na região de jorro

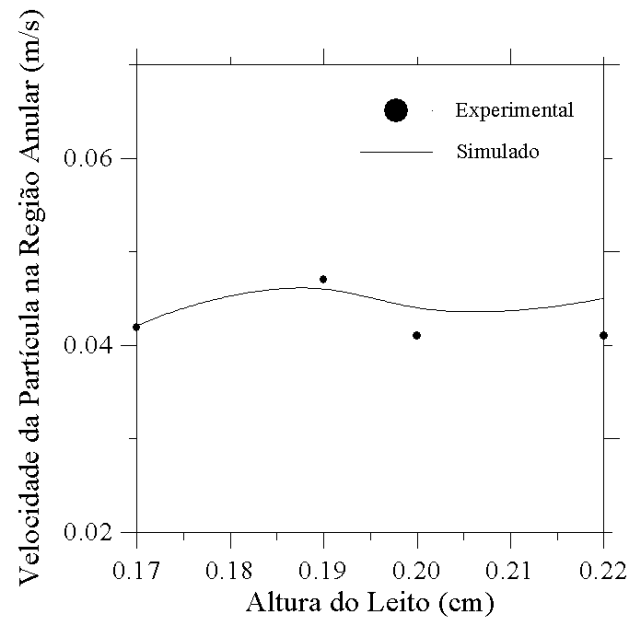


Figura 3.16 – Perfil de velocidade axial da partícula na região anular

A Figura 3.17 mostra o perfil radial da velocidade das sementes de soja em diferentes alturas do leito. Note que a velocidade diminui com o aumento da altura para a região de jorro (distância radial entre 0 e 0,022 m) e que na região anular (distância radial entre 0,022 e 0,125 m) o perfil de velocidade é ligeiramente parabólico.

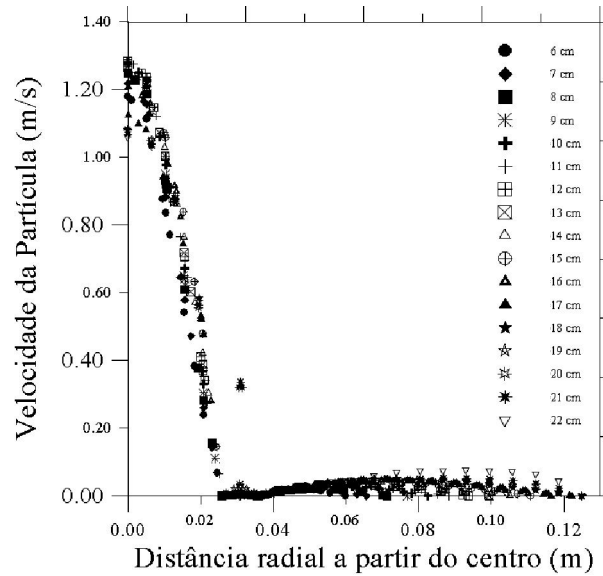


Figura 3.17 – Perfil simulado de velocidade axial da partícula em diferentes alturas do leito

A distribuição de fração de volume de sólidos é apresentada na Figura 3.18. Nota-se uma porosidade ($1 - \text{fração de volume de sólidos}$) praticamente constante na região anular e sendo esta muito menor na região central do leito e aumenta à medida que se atinge a altura máxima da fonte. A baixa porosidade na região de jorro comparada com o jorro convencional (Figura 3.4) é mais acentuada em função da presença do tubo draft, já que este provoca uma diminuição de recirculação através da interface anular-jorro.

Com base na Figura 3.18 é possível visualizar as três regiões características do leito: região anular, de jorro e fonte.

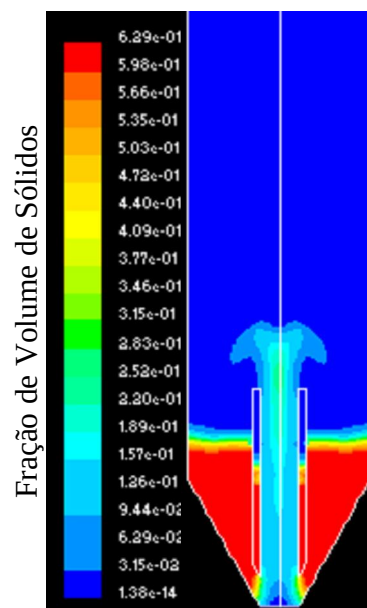


Figure 3.18 – Fração de volume de sólidos para o leito bidimensional com tubo draft.

A aplicação de CFD no estudo da fluidodinâmica do leito de jorro permite que sejam obtidas além do perfil de porosidade e velocidade das partículas e do fluido, informações muito importantes como a taxa de recirculação, a flutuação de pressão e a altura da fonte. Na seqüência é apresentado um estudo de simulação para um leito de jorro com tubo draft onde são comparadas as taxas de recirculação, altura da fonte e queda de pressão para diferentes configurações do leito.

3.5 – Estudo da Influência das Variáveis Operacionais e da Geometria sobre a Fluidodinâmica do Leito de Jorro

3.5.1 – Leito de Jorro com Tubo Draft

Nesta etapa do estudo foi realizado um planejamento fatorial em 3 níveis para o estudo da influência das variáveis D_c/D_i (diâmetro da parte cilíndrica/diâmetro da entrada do leito) e h_d (distância do tubo Draft à base do leito). Os três níveis para D_c/D_i foram 5, 6 e 7 e para distâncias do tubo à base foram 40, 50 e 60 mm. O leito de jorro adotado neste estudo possui um $D_c = 0,21$ m, ângulo da base cônica de 60° e a partícula estudada foi a semente de soja com densidade de 1173 Kg/m^3 e um diâmetro de 6,0 mm.

O tratamento e análise estatística dos resultados foram feitas com as variáveis analisadas D_c/D_i e h_d em sua forma codificada. As equações de codificação são apresentadas na seqüência.

$$x_1 = (D_c / D_i) - 6 \quad (3.34)$$

$$x_2 = \frac{h_d - 50}{10} \quad (3.35)$$

A Tabela 3.2 mostra as características do leito adotado neste estudo. Em todas as simulações realizadas para as condições supracitadas, uma mesma vazão de alimentação do ar de jorro de $144 \text{ m}^3/\text{h}$ foi adotada.

Tabela 3.2: Condições e geometrias adotadas no planejamento

D_i (m)	D_c/D_i	$H_e(m)$ (altura do leito estático)	ϵ_0
0,042	5	0,147	0,37
0,035	6	0,150	0,37
0,030	7	0,154	0,37

A Tabela 3.3 mostra os valores de Queda de pressão obtidos na simulação para o planejamento supracitado, com as variáveis na forma codificada.

Tabela 3.3: Resultados de Queda de Pressão (QP) obtidos na simulação.

x_1	x_2	QP (Pa)
-1	-1	858,2
-1	0	1145,6
-1	1	1311,1
0	-1	975,8
0	0	1298,7
0	1	1655,6
1	-1	1177,6
1	0	1499,7
1	1	1881,4

A Tabela 3.4 refere-se aos resultados da regressão do planejamento da Tabela 3.3. Nesta tabela são apresentados apenas os parâmetros com níveis de significância inferiores a 5%, os parâmetros com significância superior a 5% foram desprezados.

Tabela 3.4: Resultados da regressão para a Queda de Pressão

Fator Codificado	Parâmetro	Desvio padrão	Nível de significância
Constante	1311,52	20,38	9,48E-10
x_1	207,30	24,96	0,000165
x_2	306,08	24,96	1,79E-05
$R^2=0,96$			

Com base nos valores apresentados na Tabela 3.4, foi possível obter a Equação (3.36) de previsão da Queda de Pressão em função das variáveis estudadas (D_c/D_i e h_d) na sua forma codificada. A Equação (3.36) mostra que a queda de pressão aumenta quando a distância do tubo à base e a relação D_c/D_i são aumentados.

$$QP = 1311,52 + 207,30x_1 + 306,08x_2 \quad (3.36)$$

Através das simulações foi também possível determinar a altura da fonte para as diferentes condições. A determinação da altura da fonte foi feita com base na distribuição de porosidade (fração de volume de ar). Para isto, na simulação foi criada uma linha posicionada no centro do leito partindo da base até o topo. Posteriormente foi gerado o gráfico de distribuição de porosidade nesta linha central. No ponto em que a porosidade torna-se máxima, ou seja, igual a 1, considerou-se o topo da fonte.

A Figura 3.19 representa uma curva típica usada na determinação da altura da fonte para h_d (distância do draft a base) igual a 50 mm. As setas indicam os valores correspondentes às alturas de fonte para as relações $D_c/D_i=5,6$ e 7.

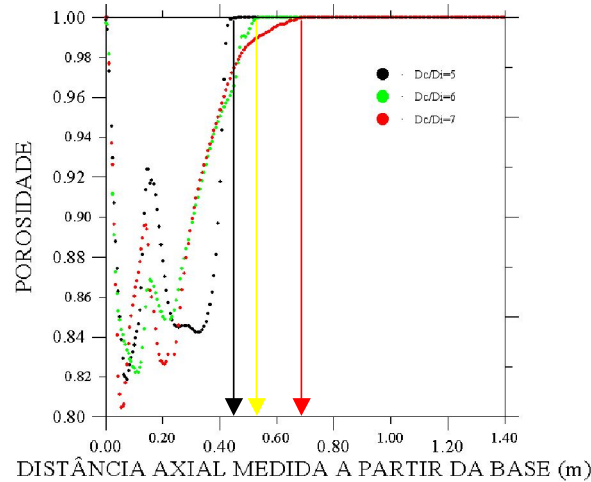


Figura 3.19 – Porosidade no eixo central do leito em função da distância axial usado na determinação da altura da fonte para $h_d = 50\text{mm}$

As Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 referem-se à influência das variáveis D_c/D_i e h_d na Queda de Pressão, Altura de Fonte e Taxa de Recirculação, respectivamente.

As Figuras 3.20 e 3.21 mostram que para um mesmo valor de D_c/D_i a Queda de Pressão aumenta e a altura da fonte diminui, quando h_d é aumentado. Contudo, para um mesmo valor de h_d a altura da fonte e a Queda de Pressão aumentam com o aumento de D_c/D_i . Nota-se pela Figura 3.22, que independente do valor de h_d a configuração onde $D_c/D_i = 6$ apresenta os maiores valores de taxa de recirculação de sólidos.

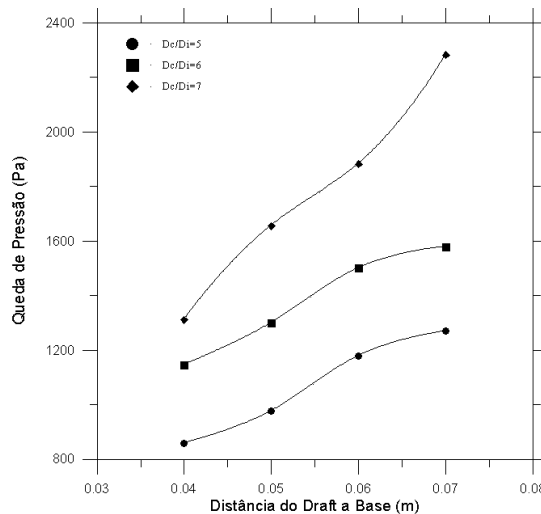
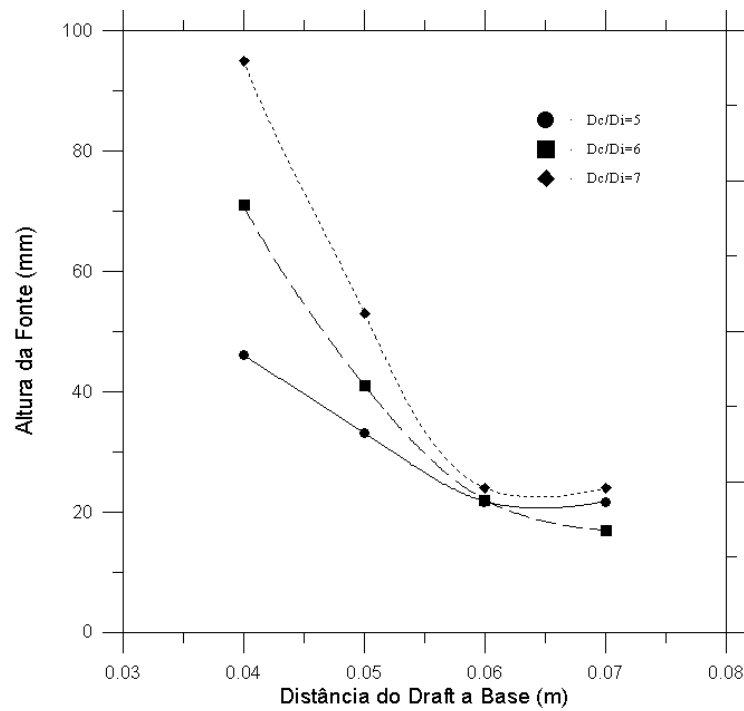
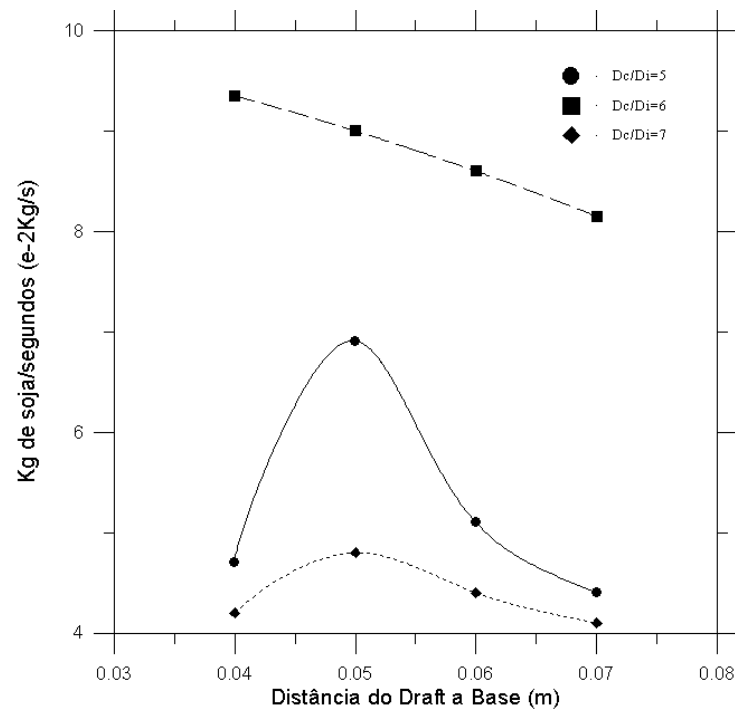


Figura 3.20 – Valores de queda de pressão para as relações D_c/D_i e h_d estudadas

Figura 3.21 – Valores de altura da fonte para as relações D_c/D_i e h_d estudadasFigura 3.22 – Valores de taxa de recirculação para as relações D_c/D_i e h_d estudadas

Através dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho foi possível verificar que a relação $Dc/Di = 6$ mostrou-se mais adequada por apresentar uma maior taxa de recirculação de partículas para as mesmas condições operacionais quando comparada com as relações $Dc/Di = 5$ e 7 . Pode-se observar ainda nas Figuras 3.20 e 3.21 que a distância de 4cm do tubo draft à base é a que apresenta os menores valores de queda de pressão e maiores valores de altura da fonte e taxa de recirculação de sólidos.

Conforme destacado no Capítulo 1, um dos objetivos do estudo de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro era identificar uma configuração adequada para o revestimento de partículas. Com base nisso, um leito com a relação $Dc/Di = 6$ e distância do tubo draft à base de 4cm foi adotado em um estudo experimental de revestimento de sementes de soja. Este estudo será abordado no próximo capítulo.

O uso de CFD no estudo da fluidodinâmica de leitos móveis tem crescido nos últimos anos, porém ainda existem poucos trabalhos relacionados ao leito de jorro. Os poucos estudos desenvolvidos em sua grande maioria se restringem ao estudo do perfil de velocidade do ar e da partícula ou distribuição de porosidade no interior do leito. Um estudo a respeito da curva característica ou até mesmo da velocidade de mínimo jorro usando CFD é um assunto ainda escasso. Um dos motivos pode ser o elevado número de simulações numéricas necessárias para se obter uma curva característica representativa, em média são necessárias 12 a 15 simulações.

Um agravante é que as simulações são feitas em estado transiente e devem ser conduzidas por pelo menos 2 segundos para que sejam representativas. Além disso, deve-se considerar o fato do sistema estudado ser multifásico e exigir a adoção de malhas híbridas que representam um aumento no esforço computacional. Pela experiência adquirida neste trabalho optou-se por usar malhas com células com tamanhos de 10% acima do diâmetro da partícula e um intervalo de tempo máximo de discretização de 1.10^{-3} segundos e mínimo de 1.10^{-6} segundos.

Considerando que quanto menores forem as células, menor será o intervalo de tempo máximo de discretização adotado, a experiência mostrou que para a faixa de tamanho de partículas, velocidade do ar de alimentação e tamanho das células estudadas, se os valores de intervalo máximo de discretização estiverem acima de 1.10^{-3} segundos, os resultados não são satisfatórios e em muitos casos a simulação acaba divergindo. Portanto, para os baixos valores de intervalo máximo de discretização, o tempo de simulação para cada condição (cada ponto de queda de pressão) correspondeu em média a 1 dia de trabalho ininterrupto com um microprocessador Pentium 4 com 3.2GHz, e Memória DDR-2 512MB 533MHZ. Assim, fica claro a dificuldade de se obter uma curva característica de jorro, podendo ser este um fator

que pode ter contribuído para que este assunto seja tão pouco explorado pela literatura. Na sequência é apresentado um estudo sobre este tema com um leito de jorro sem Tubo Draft.

3.5.2 – Leito de Jorro sem Tubo Draft

3.5.2.1 – Influência da Altura Estática do Leito

No estudo experimental e de simulação numérica do leito de jorro sem tubo draft foram adotadas várias alturas de leito estático. Para cada altura de leito foram obtidas várias informações, como por exemplo, a curva característica que será abordada no tópico a seguir.

3.5.2.1.1 – Curva Característica do Leito de Jorro

O mecanismo de transição a partir de um leito estático a um estado de jorro estabelecido pode ser descrito através da curva característica, que representa a variação da queda de pressão em função da vazão de ar de jorro.

Nesta etapa do estudo foram feitas simulações e obtidas as curvas características para sementes de soja em um leito de jorro convencional cônico-cilíndrico sem draft para diferentes alturas do leito, conforme descrito na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Condições e geometrias adotadas no planejamento

D_c (m)	D_i (m)	D_c/D_i	θ	H_e (m)	ε	ρ_s (Kg/m ³)	d_s (mm)	Draft
0,21	0,035	6	60°	0,150 0,190 0,220 0,250	0,370	1173	6,00	não

A curva característica simulada para cada altura de leito estático (H_e) foi obtida com base em 12 simulações, sendo estas referentes a diferentes valores de vazão de ar alimentada no leito. Para cada simulação foram obtidos gráficos de flutuação de pressão em função do tempo. O valor da pressão adotado como resultado de cada simulação foi o valor médio.

Um gráfico típico usado na determinação de um ponto simulado pode ser visto na Figura 3.23. Esta figura mostra que existe uma flutuação de pressão (tipicamente encontrada em trabalhos experimentais sobre flutuação de pressão em leito de jorro) em torno de um valor médio (280 Pa), o qual é adotado para composição de uma curva característica.

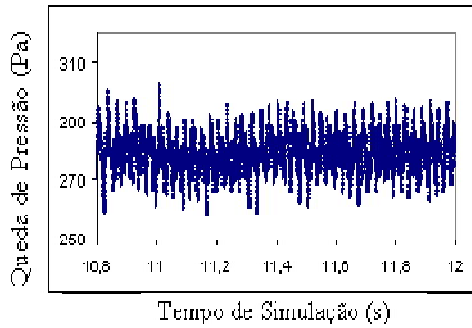


Figura 3.23 – Flutuação de Pressão Típica de um Leito de Jorro

As Figuras 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27 referem-se às quatro situações descritas na Tabela 3.5, ou seja para $He = 0,15$; $0,19$; $0,22$ e $0,25$ m de altura de leito estático, respectivamente. Observa-se uma satisfatória concordância entre os valores simulados e experimentais. Os valores simulados ficaram posicionados de forma intermediária com relação aos valores experimentais de vazões de ar crescentes e de vazões de ar decrescentes na região de maior queda de pressão. Para a região de maiores vazões de ar, os valores simulados e experimentais apresentaram uma melhor concordância. Entretanto, cabe lembrar, que a curva experimental de vazões de ar crescentes, depende muito do nível de compactação do leito, principalmente para baixas vazões de ar, podendo ser diferente em experimentos sucessivos, justificando assim o maior distanciamento entre os dados experimentais e simulados, nesta região.

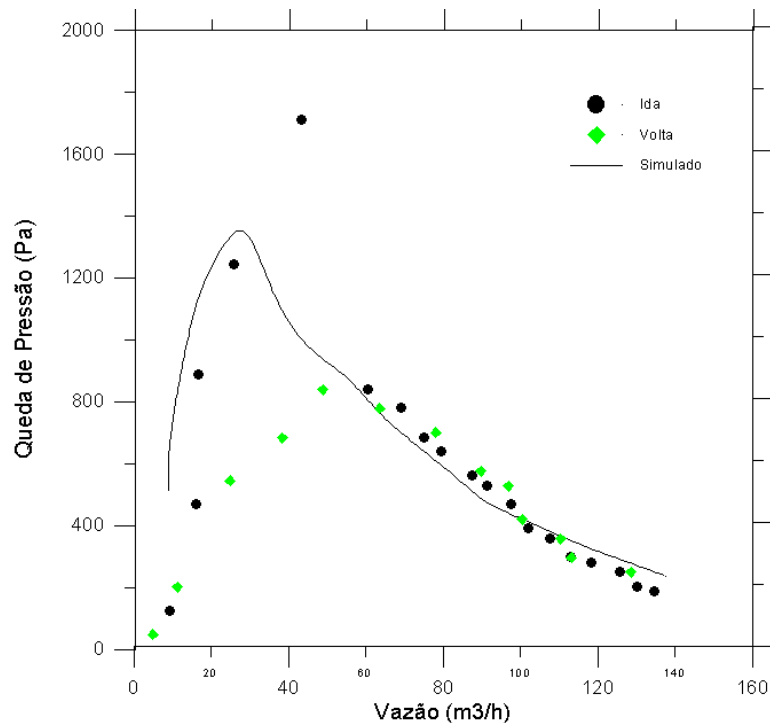
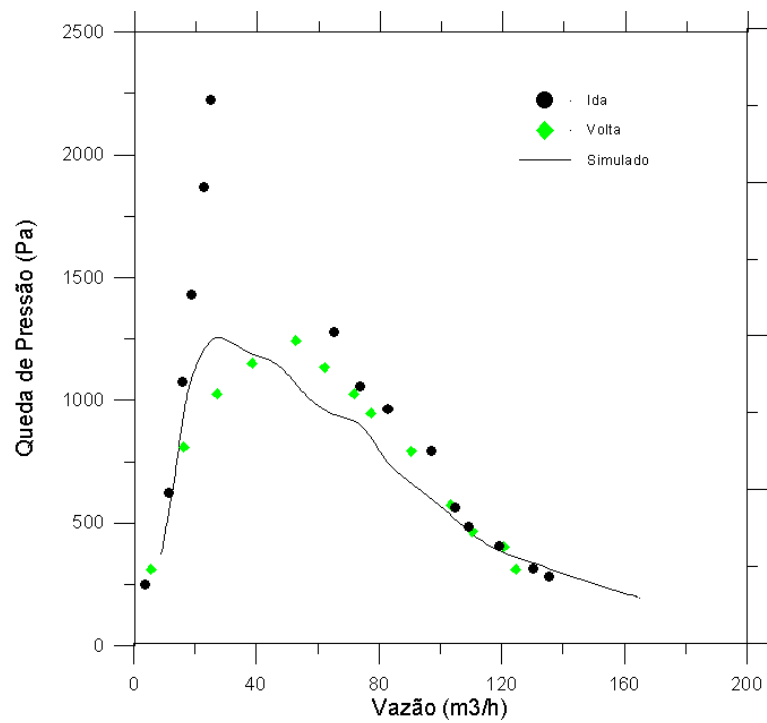
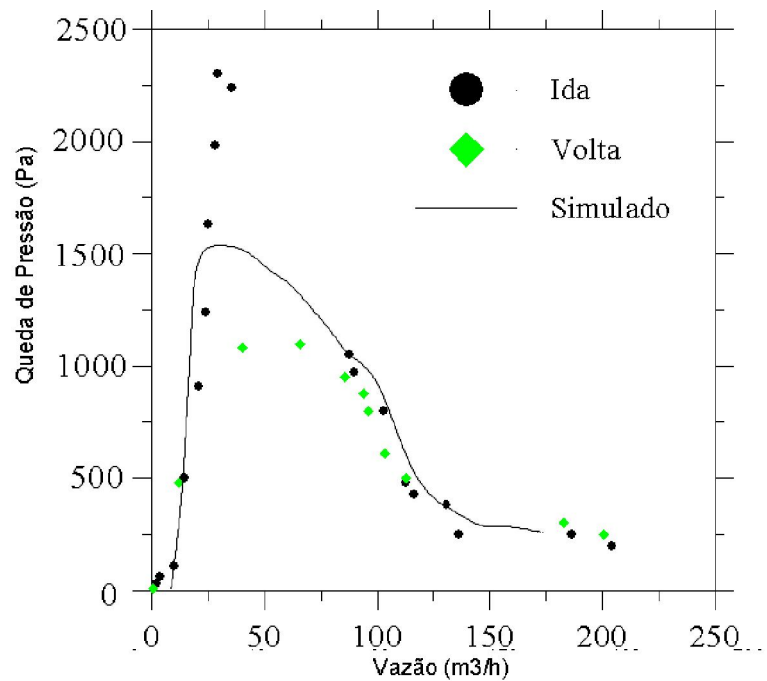


Figura 3.24 – Curva característica de Jorro para $He=0,15$ m

Figura 3.25 – Curva característica de Jorro para $He=0,19m$ Figura 3.26 – Curva característica de Jorro para $He=0,22m$

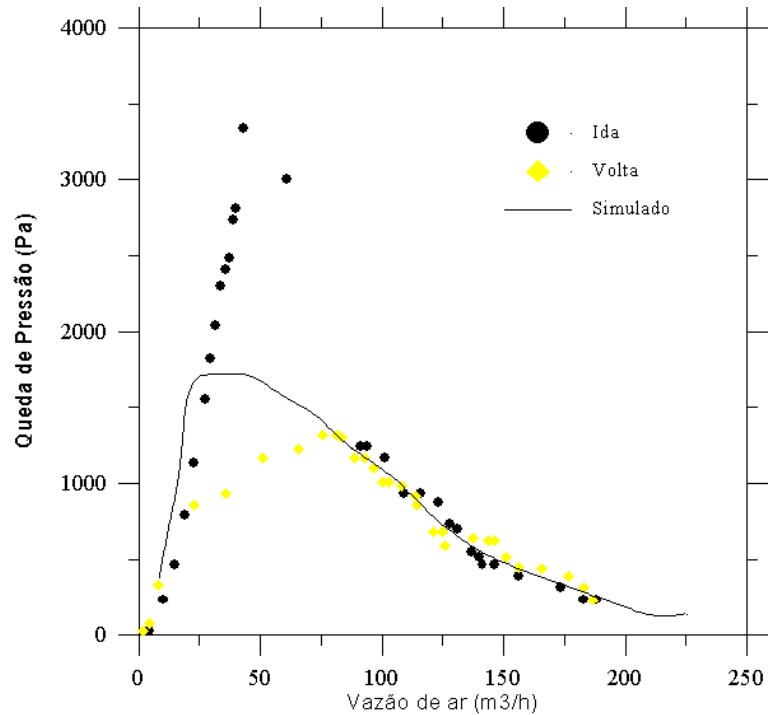


Figura 3.27 – Curva característica de Jorro para $He=0,25m$

Conforme dito anteriormente existe uma flutuação de pressão para cada condição simulada. Considerando que cada ponto de pressão das Figuras 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27 é uma média que apresenta desvio padrão associado, foi possível gerar curvas de desvio padrão normalizado em função da vazão de ar alimentada, conforme mostrado nas Figuras 3.28, 3.29 e 3.30, para $He = 0,15$, $0,19$ e $0,22$, respectivamente.

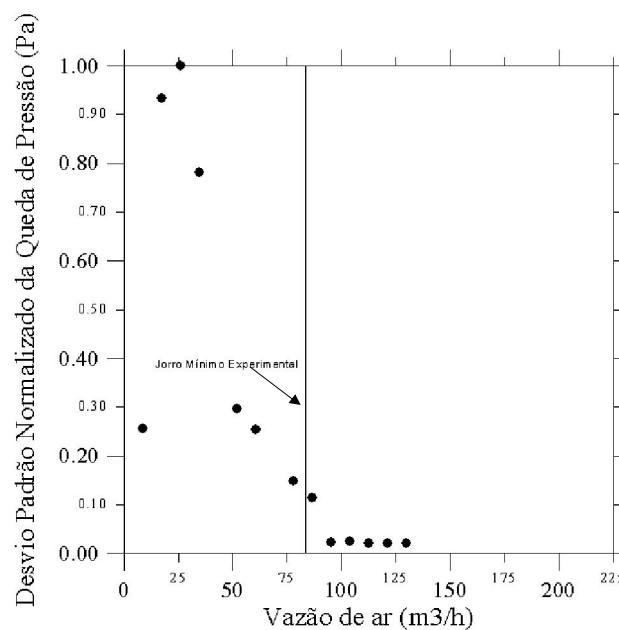


Figura 3.28 – Curva de desvio padrão normalizado para $He=0,15m$

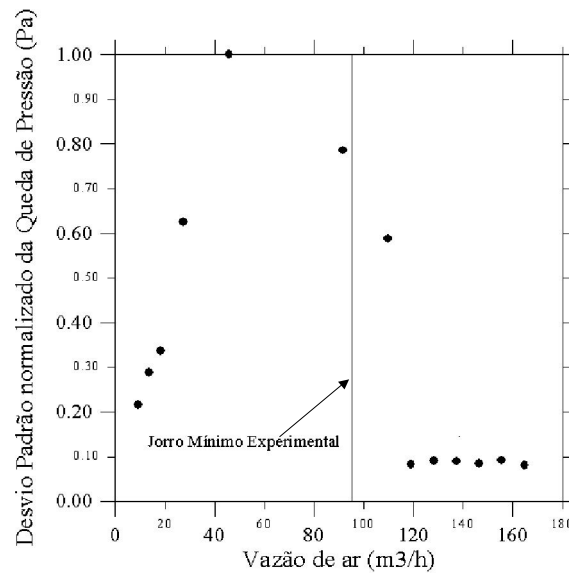


Figura 3.29 – Curva de desvio padrão normalizado para $He=0,19m$

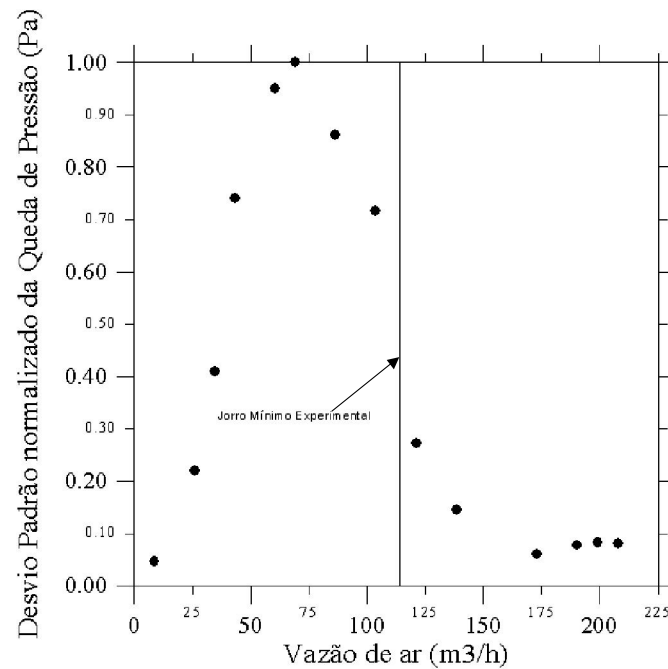


Figura 3.30 – Curva de desvio padrão normalizado para $He = 0,22m$

Note que o comportamento destas curvas é bem característico e que o desvio padrão é crescente com a vazão de ar até atingir um valor máximo. A partir deste ponto, ocorre um decréscimo do desvio padrão até atingir um valor aproximadamente constante. Além disto, constata-se que nos três casos o jorro mínimo experimental situa-se na região de desvios decrescentes, um pouco à esquerda de onde este se torna praticamente constante.

A tendência observada neste resultado de simulação está totalmente de acordo com os resultados experimentais de LOURENÇO (2006), que estudou as flutuações de pressão em um leito de jorro convencional.

Este autor observou através de um sistema de aquisição de dados experimentais, que a partir do patamar correspondente ao jorro estabelecido, à medida que ocorre a diminuição da velocidade do ar, os valores do desvio padrão tendem a aumentar, passando pelo jorro mínimo, para em seguida elevar-se mais ainda, devido à presença de uma situação de jato interno, sendo então diminuído na situação de leito estático. Esses eventos serão melhor detalhados no item a seguir.

3.5.2.1.2 – Sobre o Perfil de Fração de Volume de Sólidos

A transição de um leito estático para um leito em estado de jorro estabelecido é descrito pela curva característica, que está sujeita a seqüência de eventos conforme descrito por MATHUR e EPSTEIN(1974). As simulações destes eventos podem ser visualizados nas Figuras 3.31 e 3.32 e podem ser descritos para vazões crescentes, da seguinte forma:

Evento 1. A uma baixa velocidade do gás, este simplesmente percola as partículas sem perturbá-las e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático [Figura 3.31 (a) e Figura 3.32 (a)].

Evento 2. A uma certa velocidade do gás, a velocidade do jato se torna suficientemente alta para arrastar as partículas da vizinhança imediata à entrada de gás, formando uma cavidade relativamente vazia, um pouco acima dessa. 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 [Figura 3.31(b) e Figura 3.32 (b)].

Evento 3. 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 [Figura 3.31(c) e Figura 3.32 (c)].

Evento 4. Se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno relativamente ôco se torna grande em comparação com os sólidos empacotados acima do jorro e assim a pressão cai [Figura 3.31 –(d-n) e Figura 3.32 (d-n)].

Evento 5. 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 [Figura 3.31(o) e Figura 3.32 (o)].

Evento 6. 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 total [Figura 3.31(p-v) e Figura 3.32(p-v)].

Os eventos descritos por MATHUR e EPSTEIN (1974) podem ser visualizados através da análise do perfil simulado de distribuição de fração de volume de sólidos. Para ilustrar esta análise é apresentada a Figura 3.31, com os perfis de distribuição de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões para He de 0,25 m. Nota-se claramente o momento em que o jorro mínimo é formado (Figura 3.31-o) e a vazão de ar de alimentação e queda de pressão correspondentes.

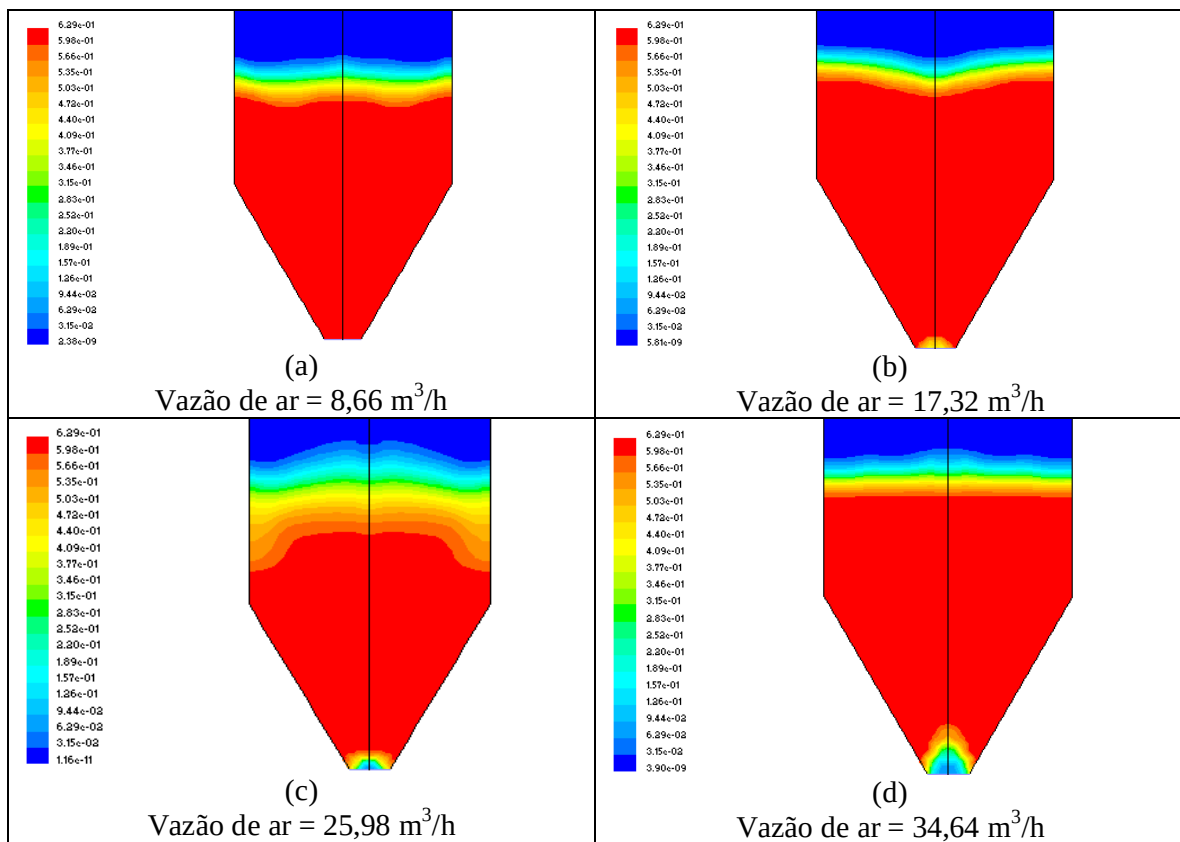
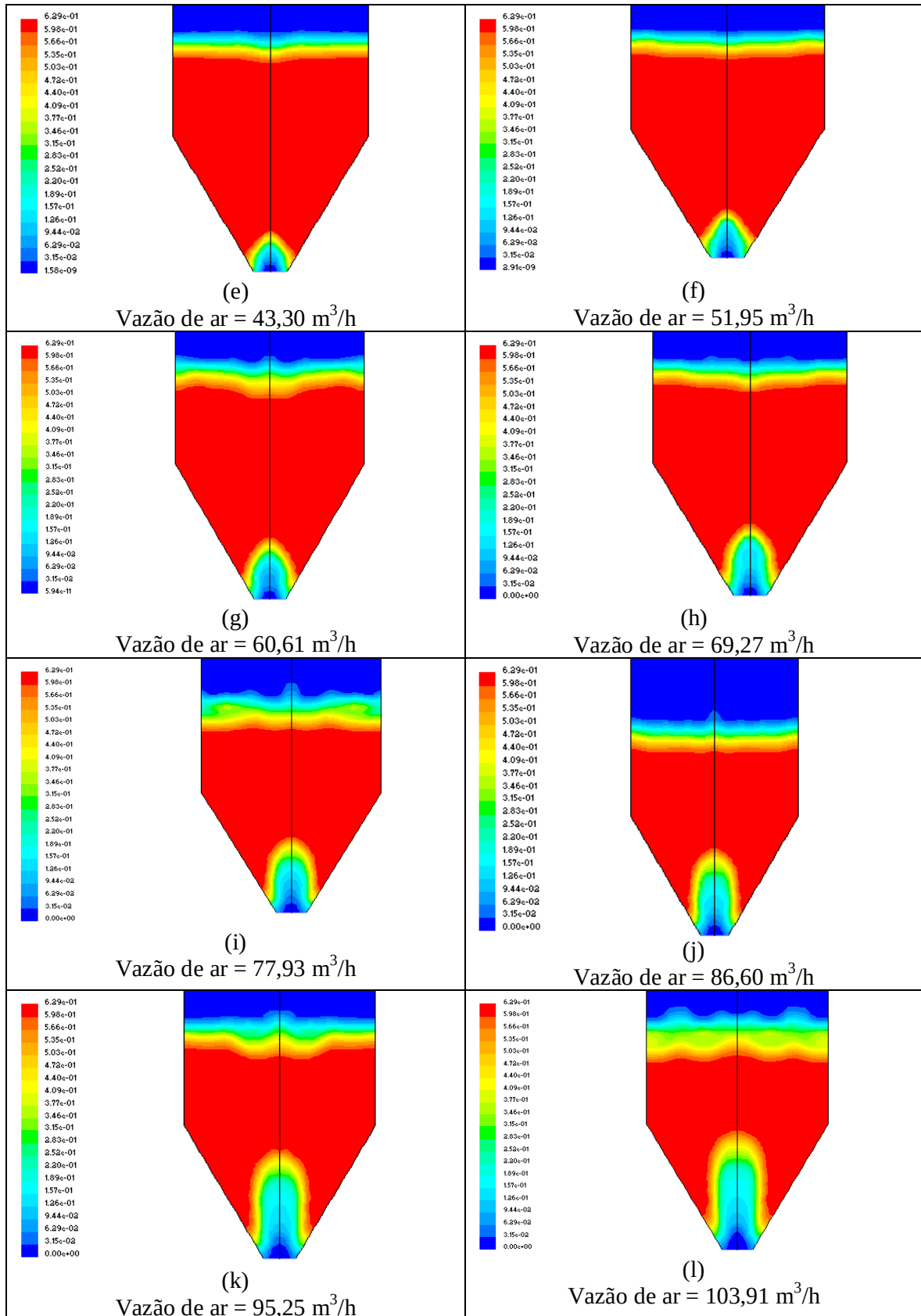
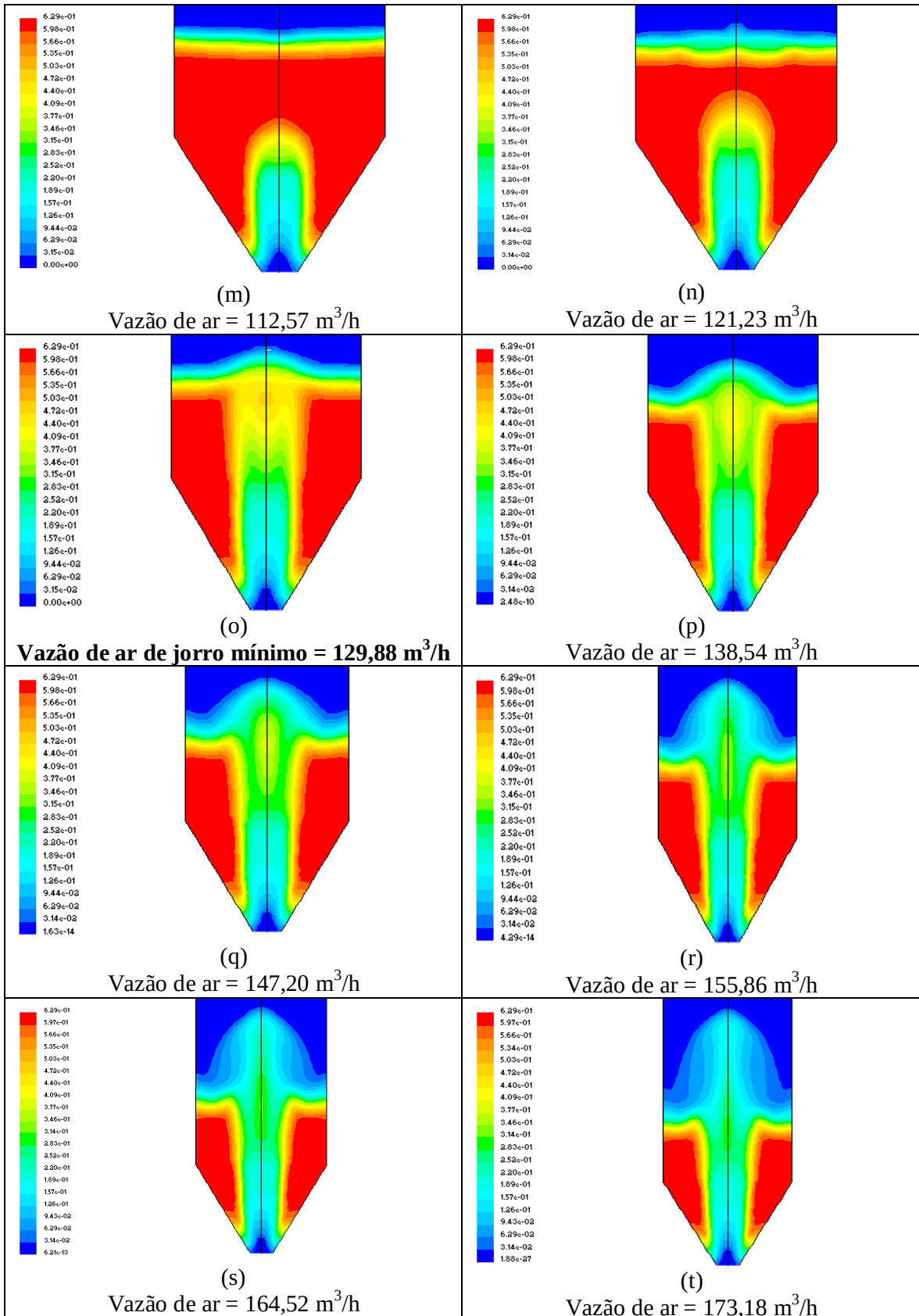
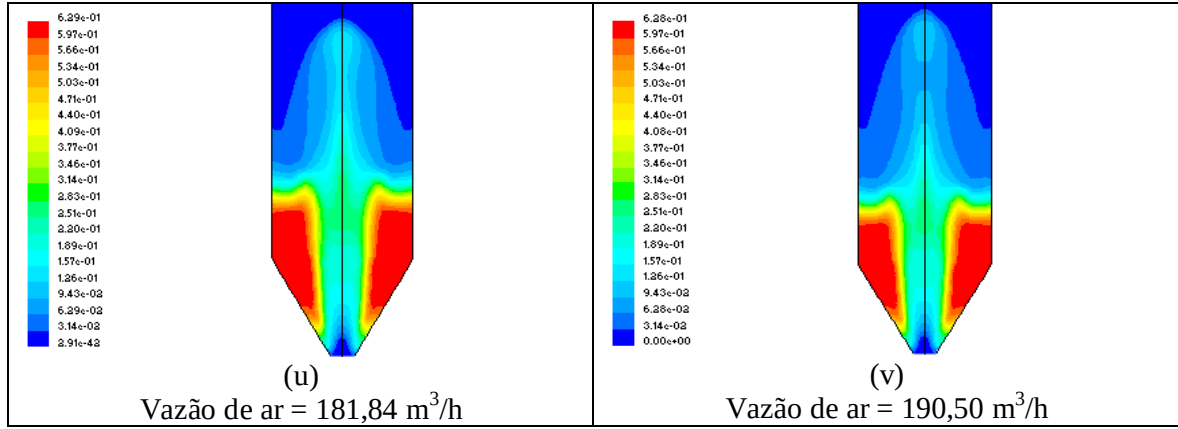


Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25$ m

Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25$ m



Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25$ m

Cont. Figura 3.31 - Perfil de fração de volume de sólidos para $He=0,25$ m

Com base nos dados da Figura 3.31, , pode-se verificar que a vazão de ar de jorro mínimo simulada é de 129,9 m³/h. Esta mesma análise foi adotada para obter os valores simulados para as demais condições estudadas.

3.5.2.1.3 – Sobre a Velocidade de Jorro Mínimo

A literatura apresenta várias correlações para o cálculo de velocidade de mínimo jorro (U_{ms}). Algumas destas correlações foram adotadas neste trabalho para avaliar a capacidade de previsão dessa variável pelas simulações em CFD. As seguintes equações foram usadas na comparação com os valores simulados e os valores experimentais.

- Mathur e Gishler (1955)

$$U_{ms} = \left(\frac{d_s}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (3.37)$$

- Uemaki *et al.* (1983)

$$U_{ms} = 0,977 \left(\frac{d_s}{D_c} \right)^{0.615} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0.274} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0.324} \quad (3.38)$$

- Ogino *et al.* (1993)

$$U_{ms} = 0,0151 \left(\frac{\varepsilon^4}{2(1-\varepsilon)} \right)^{0.5} \left((1-\varepsilon) \frac{\rho(\rho_s - \rho_f)gD_c^3}{\mu_f^2} \right)^{0.25} \left(\frac{d_s}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (3.39)$$

- San José et al (1995)

$$U_{ms} = \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^2 \left(\frac{\mu}{\rho_f d_s} \right) \left(0,126 \left(\frac{g d_s^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{\mu^2} \right)^{0,5} \left(\frac{D_c}{D_i} \right)^{1,68} \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \right) + \left(\frac{d_s}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right) \left(\frac{2g(H - H_c)(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0,5} \quad (3.40)$$

A Tabela 3.6 apresenta os valores de vazão de ar na condição de jorro mínimo (Q_{jmin}), obtidos experimentalmente, calculados a partir das correlações que acabam de ser apresentadas, bem como a partir das simulações por CFD e os respectivos desvios.

Tabela 3.6 – Comparação entre os valores de Q_{jmin} simulados, calculados e experimentais.

	Q_{jmin} (m ³ /h)					
H_e (m)	Exp.	CFD	Eq. 3.37	Eq. 3.38	Eq. 3.39	Eq. 3.40
0,15	83,7	82,5	104,0	109,8	135,9	89,6
0,19	105,0	95,3	117,1	118,5	153,0	119,9
0,22	117,5	117,0	125,9	124,3	164,6	128,0
0,25	131,0	129,9	134,3	129,5	175,5	167,3
Desvio Relativo (%)		3,7	13,2	14,3	57,3	20,2

A Tabela 3.6 mostra que os valores obtidos pela simulação em CFD apresentam os menores desvios em relação aos valores experimentais com um desvio relativo de 3,7%.

Portanto, o modelo Euleriano Multifásico Granular pode ser usado para identificar a condição de jorro mínimo. Este modelo também pode ser usado para simular o leito de jorro com diferentes geometrias, condições operacionais e tipos de partículas. Cabe lembrar também, que as correlações empíricas apresentam uma faixa de validade restrita à geometria, condições operacionais e densidade de partículas. Portanto, a simulação em CFD é uma boa alternativa para predição da vazão de ar de jorro mínimo em condições fora da faixa da validade das correlações empíricas.

3.5.2.1.4 – Sobre o Perfil de Pressão

A descrição de MATHUR e EPSTEIN (1974) para os eventos que mostram o mecanismo de formação de um leito em estado de jorro a partir de um leito estático, mencionada anteriormente, também pode ser confrontada com os resultados de simulação apresentados na

Figura 3.32. Esta Figura mostra os perfis de queda pressão no leito, referentes a uma altura de leito estático $He=0,25$ m, para as mesmas condições descritas na Figura 3.31. Observa-se também na Figura 3.32, a identificação do momento em que o jorro incipiente é obtido (Figura 3.32(o)).

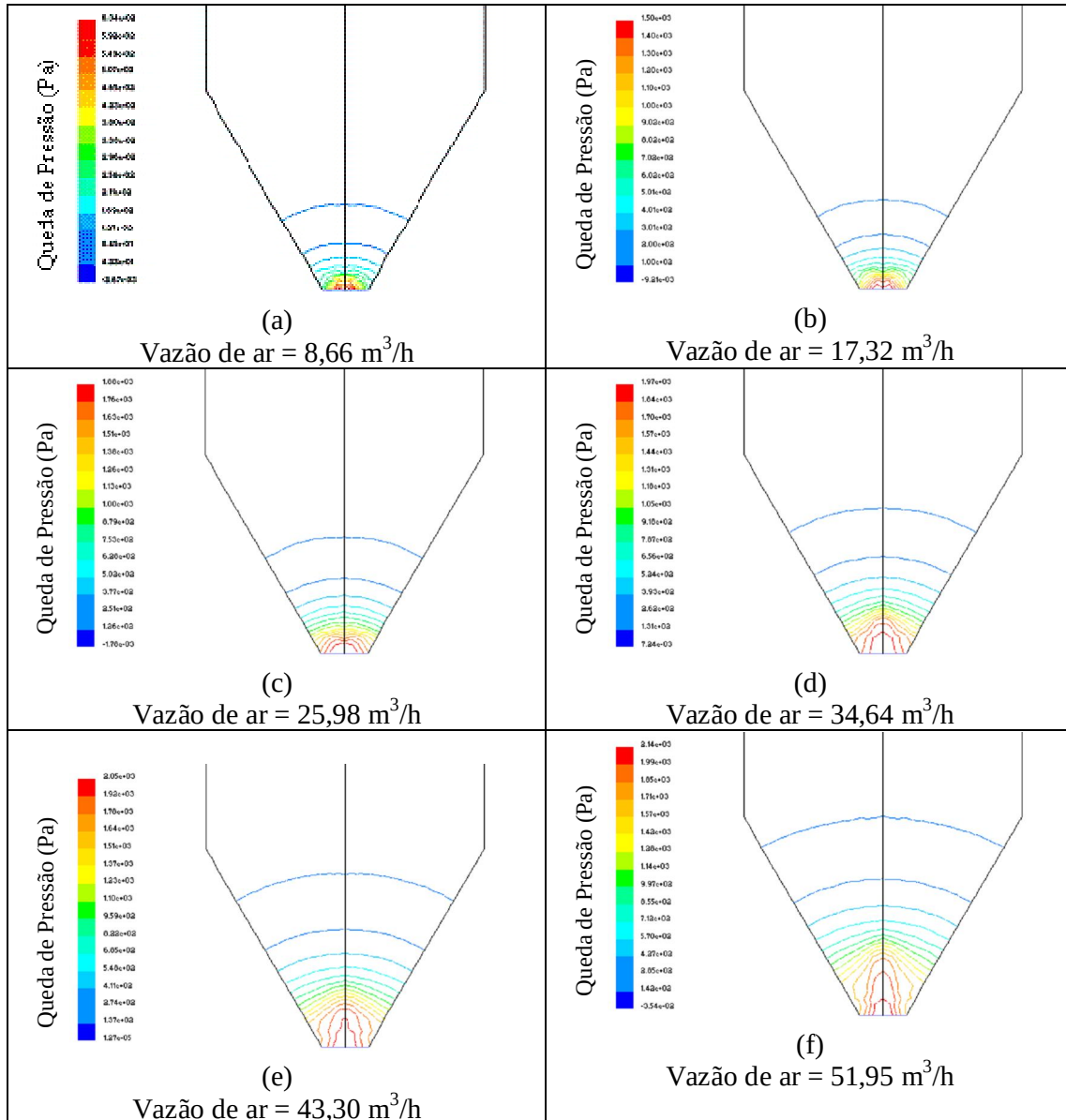
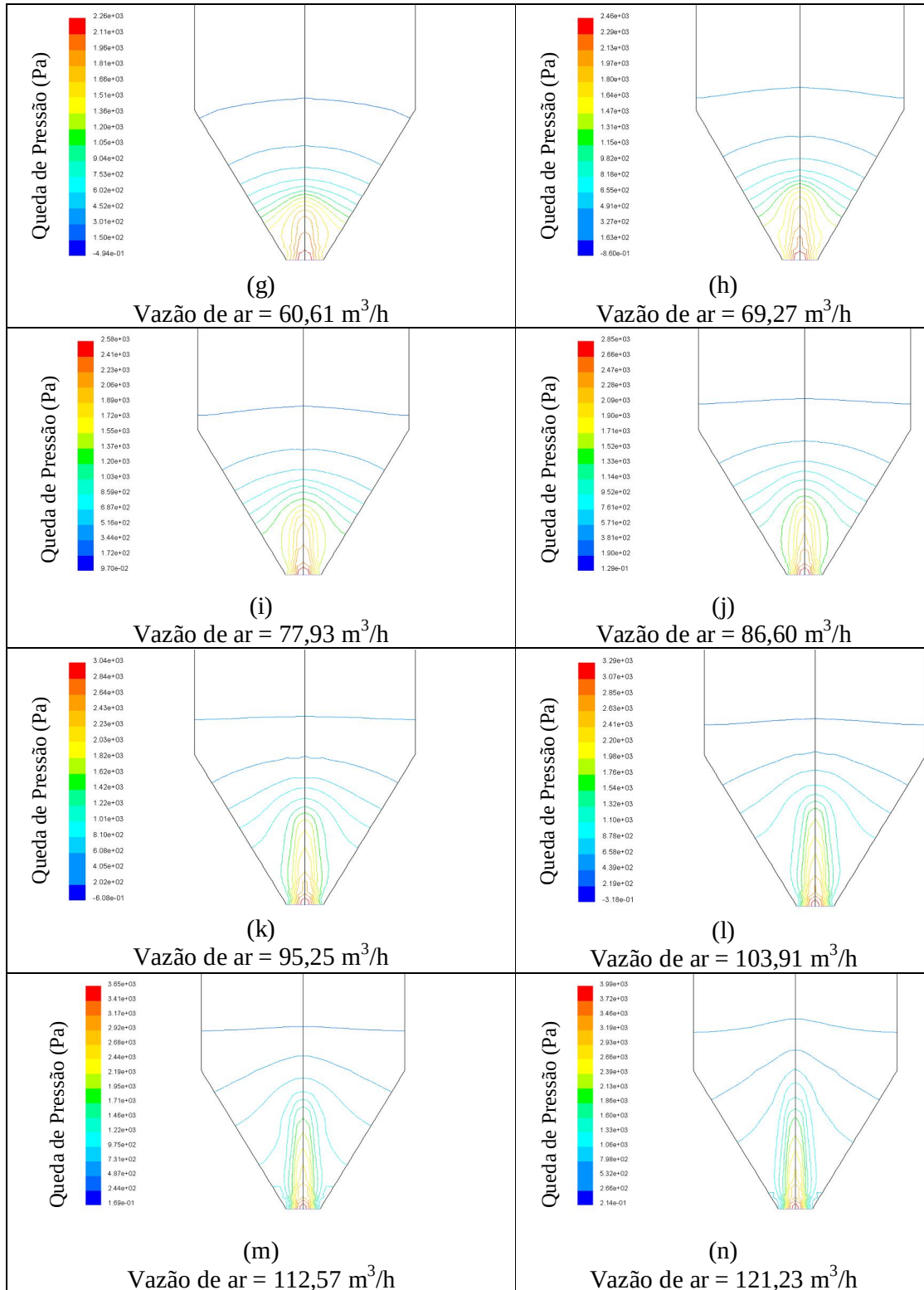
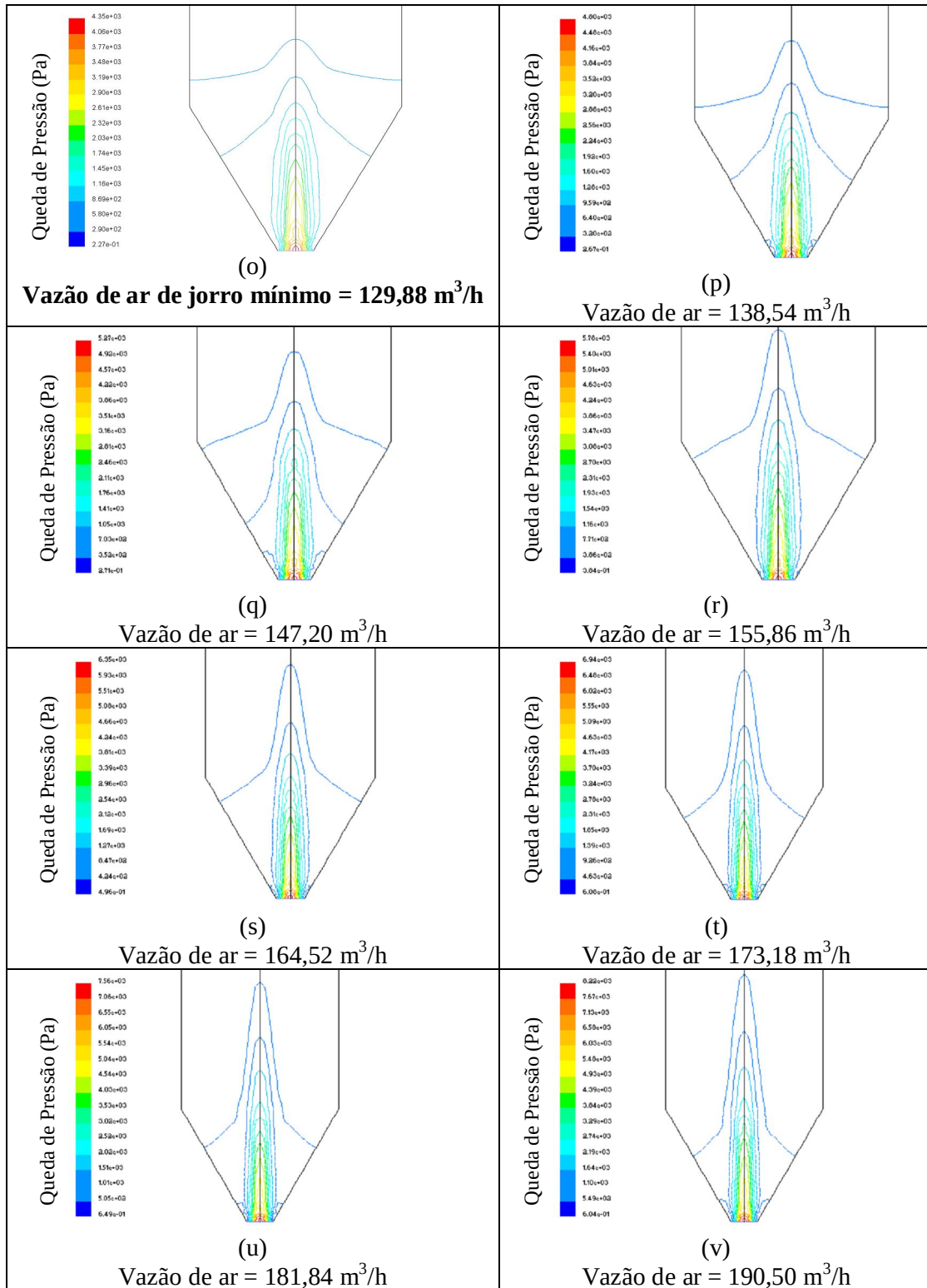


Figura 3.32 - Perfil de pressão (Pa) para $He=0,25$ m



Cont. Figura 3.32 - Perfil de pressão para $He=0,25$ m

Cont. Figura 3.32 - Perfil de pressão para $He=0,25$ m

Portanto, os eventos envolvidos na formação do leito de jorro a partir de um leito estático podem ser simulados usando o modelo adotado neste trabalho. A técnica de CFD pode ser

usada para prever o comportamento fluidodinâmico desde um leito estático até o leito em regime de jorro.

3.5.2.2 – Influência do Diâmetro das Partículas

No item anterior ficou claro que se pode utilizar o modelo Euleriano Granular Multifásico para determinação da condição de jorro mínimo simulada. Nesta seção serão comparados os comportamentos fluidodinâmicos de um leito de jorro idêntico ao estudado no item anterior, porém, com partículas de esfera de vidro com densidade de 2503 Kg/m^3 e diferentes tamanhos. As condições adotadas na simulação podem ser vistas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Condições e geometrias adotadas no estudo da influência do diâmetro da partícula da fluidodinâmica do leito de jorro

D_c (m)	D_i (m)	D_c/D_i	θ	H_e (m)	ρ_s (Kg/m ³)	ε_o	d_s (mm)	Draft
0,21	0,035	6	60°	0,19	2503	0,412 0,391 0,381	2,00 4,00 6,00	Não

3.5.2.2.1 – Sobre a Curva de Pressão Total versus Vazão de Ar de Jorro

Como visto anteriormente, é possível identificar a vazão de ar de jorro mínimo através da análise do perfil de fração de volume de sólidos e do gráfico de desvio padrão da flutuação de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro. Além disto, como será mostrado nesse item, a vazão de ar de jorro mínimo pode ser obtida através da análise do perfil de pressão total versus vazão de ar de jorro. As Figuras 3.33, 3.34 e 3.35 apresentam a distribuição de pressão total em função da vazão de ar de jorro para as esferas de vidro de 2, 4 e 6 mm, respectivamente.

Nota-se nessas figuras, que apesar das diferenças de comportamento apresentadas nas regiões de menor vazão de ar, é comum em todos os casos analisados, a ocorrência de uma região de crescimento contínuo da pressão total com o aumento da vazão de ar de jorro (região localizada à direita da seta inserida na figura), situada muito próximo ao jorro mínimo.

A pressão total crescente, a partir da condição de jorro mínimo (jorro estável) é explicada pela estabilização da pressão estática, nesta condição, e pela correspondente crescente pressão dinâmica. Como mostrado nas curvas características apresentadas anteriormente, para vazões

inferiores a condição de jorro mínimo, a variação da pressão estática, depende muito da faixa de velocidade, principalmente na região onde ocorre a cavidade e o jorro interno. Este comportamento também é influenciado pelo tamanho das partículas.

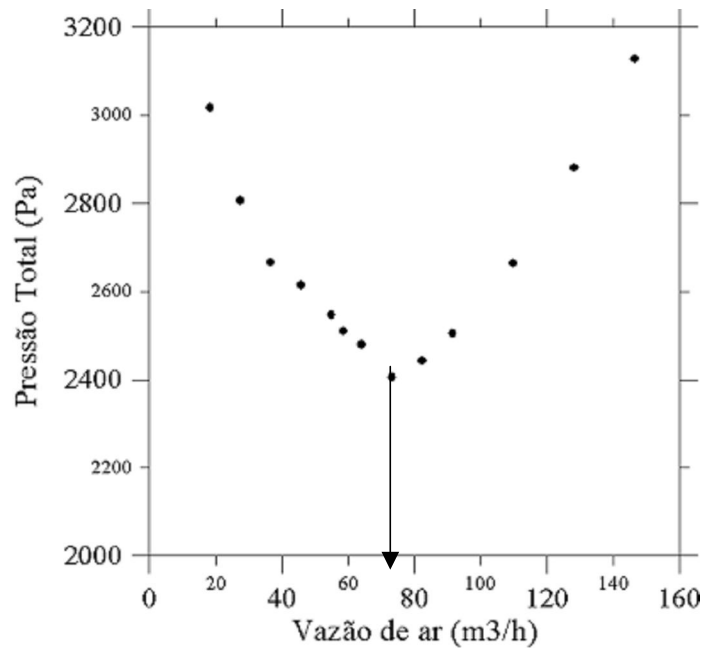


Figura 3.33 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=2\text{mm}$)

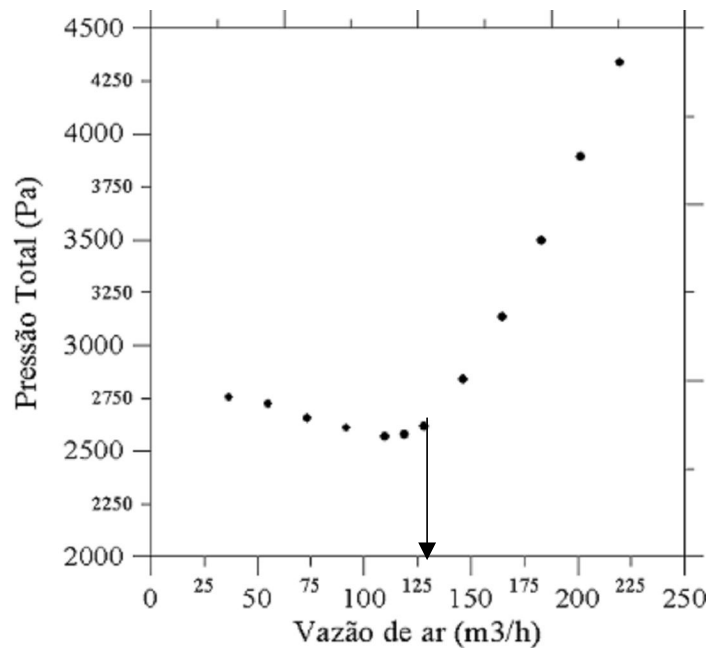


Figura 3.34 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=4\text{mm}$)

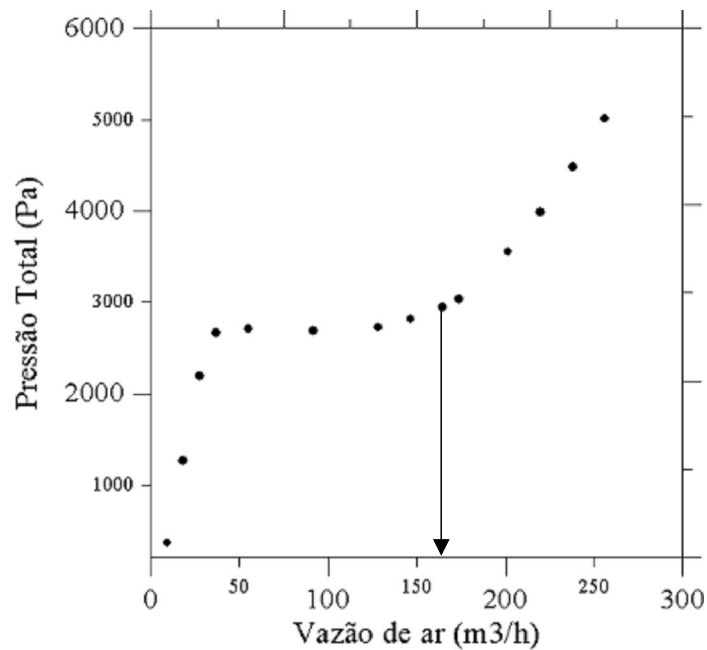


Figura 3.35 – Pressão total versus vazão de ar de jorro (Esferas com $d_s=6\text{mm}$)

3.5.2.2.2 – Sobre o Perfil de Fração de Volume de Sólidos

Como mencionado anteriormente, uma maneira útil de se determinar a condição de jorro mínimo é através da análise dos gráficos de perfis de fração de volume de sólidos. A seguir são apresentadas as Figuras 3.36, 3.37 e 3.38 com os perfis de fração de volume de sólidos para as esferas de vidro de 2, 4 e 6 mm respectivamente.

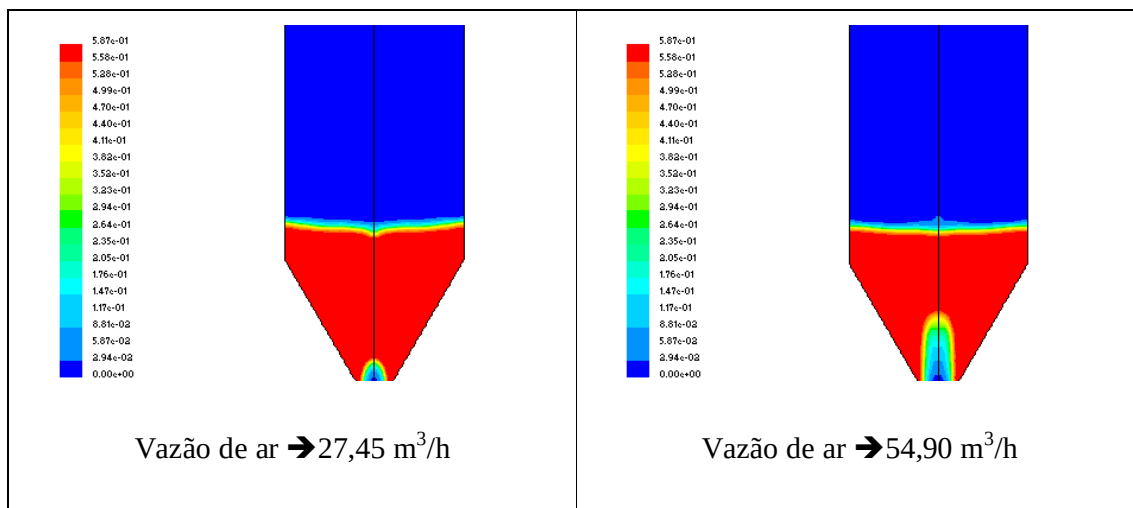
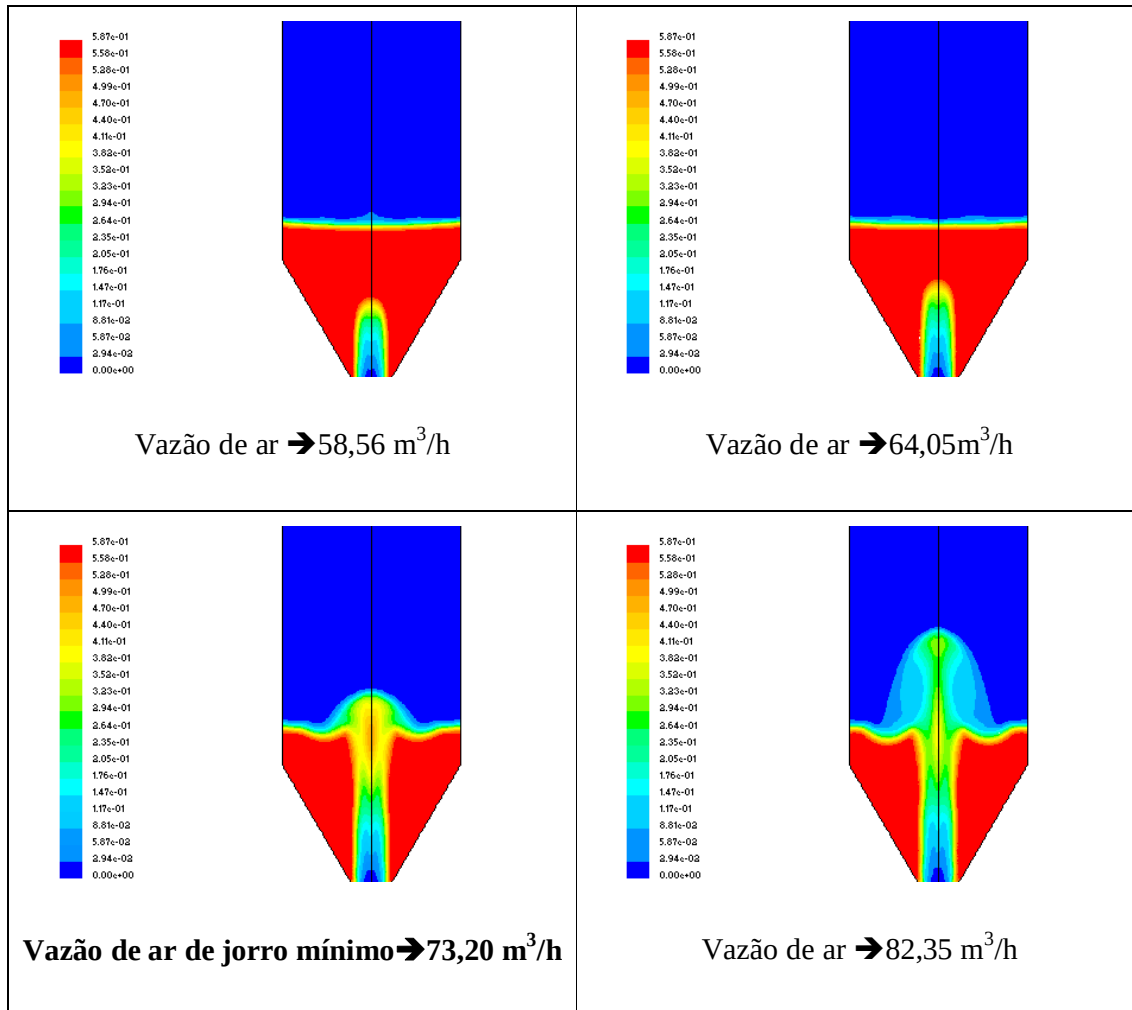


Figura 3.36 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 2mm.



Cont. Figura 3.36 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 2mm.

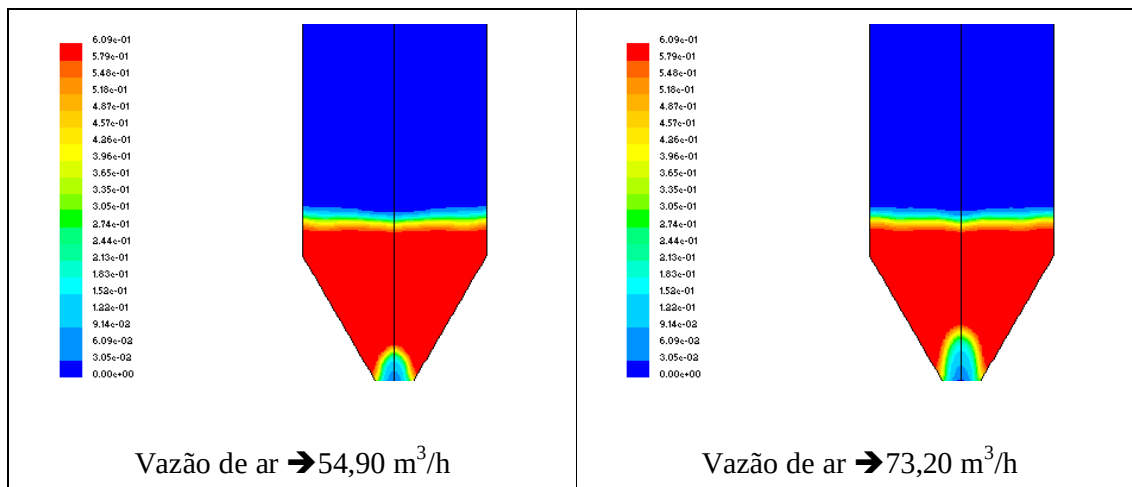
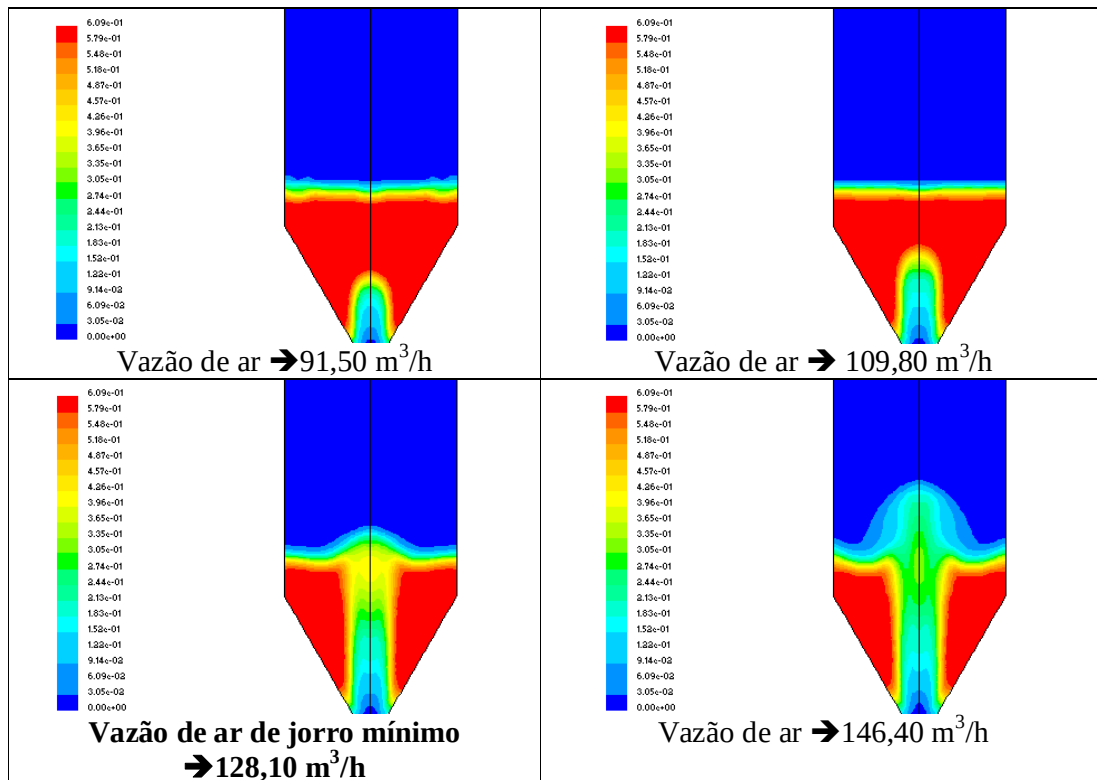


Figura 3.37 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 4mm.



Cont. Figura 3.37 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 4mm.

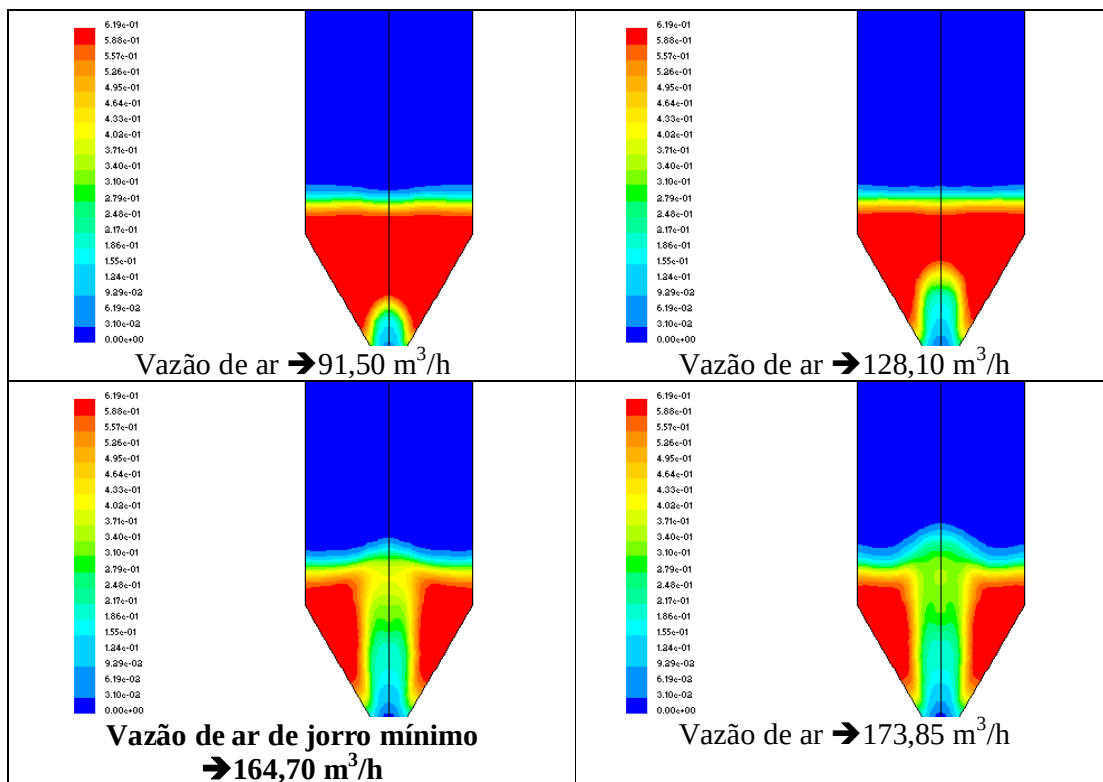


Figura 3.38 – Perfil de fração de volume de sólidos e suas respectivas vazões de ar para esfera de vidro com diâmetro de 6mm

Ao comparar as Figuras 3.33, 3.34 e 3.35 (pressão total) com as Figuras 3.36, 3.37 e 3.38 (fração de sólidos), verifica-se que existe uma concordância entre a identificação das condições de jorro mínimo e jorro estável pela pressão total e pelo perfil de fração de volume de sólidos.

Na sequência será apresentado um estudo feito com base em dados e resultados obtidos por OLAZAR (2001). Esta parte do trabalho trata-se de uma parceria firmada com o professor Dr. Martin Olazar do Departamento de Engenharia Química da Universidade do País Basco, Bilbao, Espanha.

3.5.3 – Para o Leito Cônico Descrito por OLAZAR (2001)

O professor Martin Olazar nos cedeu gentilmente alguns de seus mais de 2000 dados usados em seu estudo para determinação de vazão de ar de jorro mínimo e queda de pressão de jorro mínimo em leito cônico. O leito de jorro estudado por OLAZAR (2001) e que foi adotado nas simulações desta seção segue a configuração mostrada na Figura 3.39.

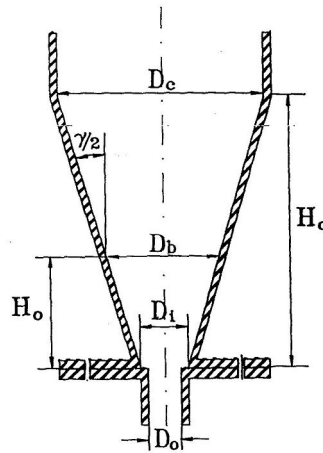


Figura 3.39 – Configuração do leito estudado por OLAZAR (2001).

Na Figura 3.39 D_c refere-se ao diâmetro da parte cilíndrica, D_b ao diâmetro do leito estagnado, D_i diâmetro da base cônica, D_o diâmetro da entrada do leito, H_o altura do leito fixo, H_c altura da parte cilíndrica e γ ângulo do cone. No estudo de OLAZAR (2001) foram adotados valores fixos de $D_c=0,36\text{m}$ e $D_i=0,063\text{m}$ e os demais parâmetros foram variados conforme mostrado na sequência.

$\gamma = 28, 33, 36, 39$ e 45° ;

$H_c = 0,60, 0,50, 0,45, 0,42$ e $0,36\text{ m}$;

$D_o = 0,03, 0,04$ e $0,05\text{ m}$;

H_0 = entre 0,05 e 0,35 m.

No estudo de OLAZAR (2001) foram usados 20 tipos diferentes de partículas e pôde-se então obter uma correlação para determinação da vazão de ar de jorro mínimo e uma outra para queda de pressão de jorro mínimo. Estas equações são apresentadas a seguir.

$$(Re_o)_{ms} = 0,126 Ar^{0,5} \left(\frac{D_b}{D_o} \right)^{1,68} \left[\tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]^{-0,57} \quad (3.41)$$

$$-\frac{\Delta P_s}{H_e \rho_b g} = 1,20 \left[\tan \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]^{-0,11} (Re_o)_{ms}^{-0,06} \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^{0,08} \quad (3.42)$$

A Equação (3.42) refere-se ao número de Reynolds na entrada do leito (baseado em D_o) e o termo Ar refere-se ao número de Arquimedes. Considerando as múltiplas configurações de leito cônico e partículas foi feita uma escolha de algumas condições para simulação. A Tabela 3.8 refere-se às condições estudadas para esfera de vidro com densidade de 2420 Kg/m^3 e porosidade do leito estático de 0,361 e diâmetro da partícula de 6 mm.

Tabela 3.8 – Condições estudadas por OLAZAR (2001)

	D_o (m)	γ (°)	H_e (m)
Condição1	0,05	45	0,20
Condição 2	0,03	28	0,33
Condição.3	0,04	45	0,20

3.5.3.1 – Resultados para Condição 1 de Olazar

Conforme mencionada anteriormente a técnica de simulação adotada permite identificar a vazão de ar de jorro mínimo e também a queda de pressão correspondente. A partir da condição 1 da Tabela 3.8 foram geradas por simulação, a Figura 3.40 de pressão total versus vazão de ar de jorro, e a Figura 3.41 de distribuição de fração de volume de sólidos referente a condição de jorro mínimo. O Anexo 4 apresenta os perfis de fração de volume de sólidos para as demais condições de vazão de ar estudadas neste item.

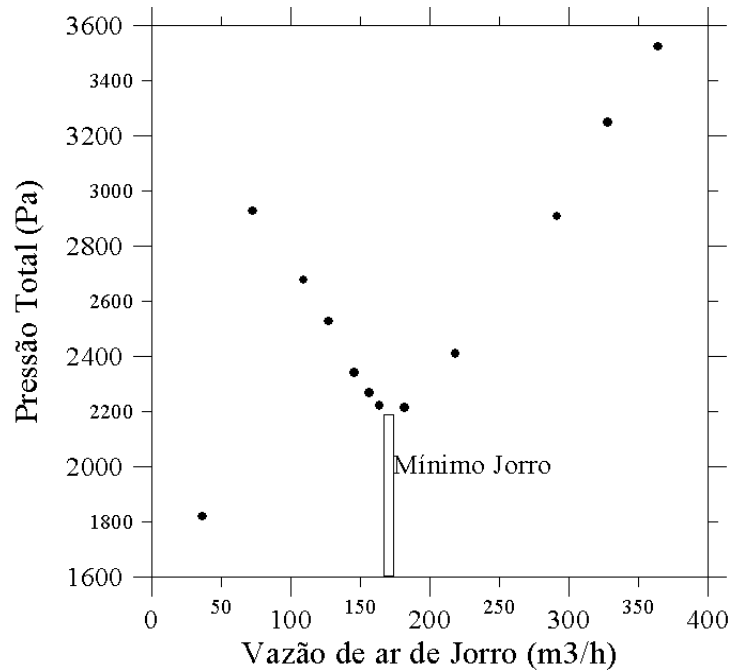


Figura 3.40 – Pressão total versus vazão de ar de jorro para Cond.1

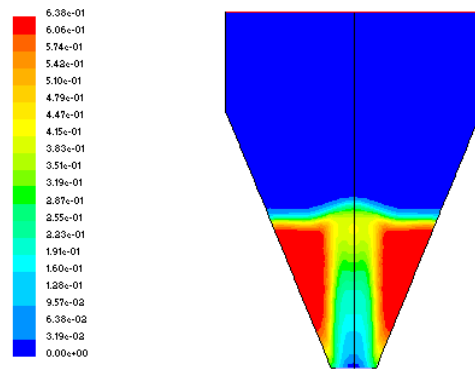


Figura 3.41 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo
 Q_{jmin} (m³/h) = 164,0 e queda de pressão (Pa) = 1749,0

Analisando as Figuras 3.40 e 3.41 pode-se obter o valor da vazão de ar de jorro mínimo em D_o , sendo esta $Q_{min}=164,0$ m³/h ou ainda a queda de pressão correspondente $\Delta P_{s_{min}}=1749,0$ Pa.

3.5.3.2 – Resultados para Condição 2 de Olazar

Para condição 2 da Tabela 3.8 foram geradas a Figura 3.42 de pressão total versus vazão de ar de jorro e a Figura 3.43 de distribuição de fração de volume de sólidos referente a condição de jorro mínimo. O Anexo 4 apresenta os perfis de fração de volume de sólidos para as demais condições de vazão de ar estudadas neste item.

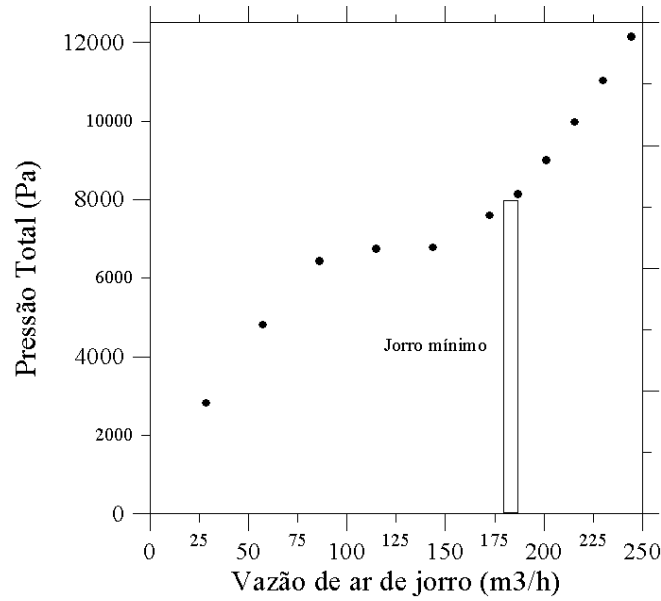


Figura 3.42 – Pressão total versus vazão de ar de jorro para Cond.2

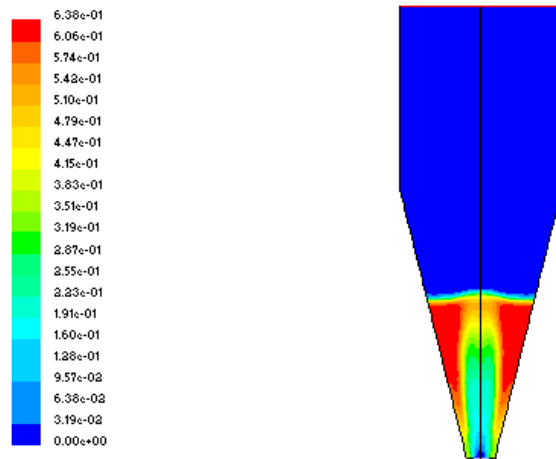


Figura 3.43 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo
 Q_{jmin} (m³/h) = 187,0 e queda de pressão (Pa) = 2734,0

Analisando as Figuras 3.42 e 3.43 pôde-se obter o valor da vazão de ar de jorro mínimo em D_o sendo esta $Q_{min}=187,0$ m³/h ou ainda a queda de pressão correspondente $\Delta P_{s_{min}}=2734,0$ Pa.

3.5.3.3 – Resultados para Condição 3 de Olazar

Para esta condição o valor da vazão de ar de jorro mínimo e queda de pressão correspondente foram obtidos através da análise gráfica do perfil de fração de volume de sólidos. A Figura 3.44 mostra a condição de jorro mínimo e o Anexo 4 apresenta os perfis de fração de volume de sólidos para as demais condições de vazão de ar estudadas neste item.

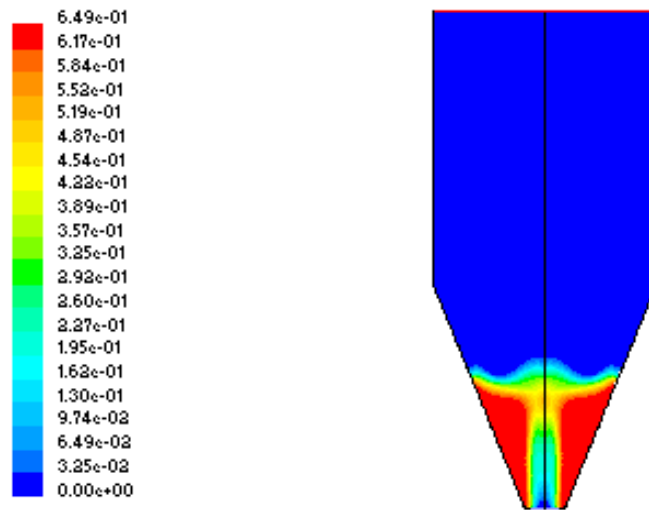


Figura 3.44 – Distribuição de fração de volume de sólidos para condição de jorro mínimo Q_{min} (m^3/h) = 102,80 e queda de pressão (Pa) = 2576,0

3.5.3.4 – Comparação dos Resultados Simulados e Calculados para as Condições de Olazar (2001)

A Tabela 3.9 mostra a comparação dos valores de vazão de mínimo jorro simulados e os obtidos pela Equação (3.41) de OLAZAR (2001) para as condições 1, 2 e 3 da Tabela 3.8.

Tabela 3.9 – Comparação entre a simulação via CFD e as equações de OLAZAR (2001) para a velocidade de jorro mínimo.

	Q_{min} (m^3/h)		Desvio Relativo (%)
	CFD	Olazar (2001)	
Cond.1	164,0	196,3	19,65
Cond.2	187,0	209,7	12,13
Cond.3	102,8	127,7	24,24
Desvio Médio			18,67

A Tabela 3.10 mostra a comparação dos valores de queda de pressão simulados e os obtidos pela Equação (3.42) de OLAZAR (2001) para as condições 1, 2 e 3 da Tabela 3.8. Nota-se uma razoável concordância entre os valores obtidos pelas Equações (3.41 e 3.42) de OLAZAR (2001) e os valores simulados via CFD tanto para vazão de mínimo jorro (Tabela 3.9), quanto para queda de pressão (Tabela 3.10) para o leito de jorro cônico. Cabe ressaltar, que as condições adotadas nestas simulações fizeram parte daquelas adotadas por OLAZAR (2001) na determinação de suas equações, e que conforme descrito por este autor, o desvio

máximo entre o valor obtido pela correlação e o experimental foi de 5 % para a velocidade de mínimo jorro (Equação 3.41) e de 9 % para a equação de queda de pressão (Equação 3.42).

Tabela 3.10 – Comparação entre a simulação via CFD e as equações de OLAZAR (2001) para a queda de pressão de jorro mínimo.

	$\Delta P_{smin}(\text{Pa})$		Desvio Relativo (%)
	CFD	Olazar (2001)	
Cond.1	1749,0	1469,54	19,00
Cond.2	2734,0	2589,00	5,59
Cond.3	2576,0	2436,44	5,74
Desvio Médio			10,11

Para a condição 3 da Tabela 3.8 foi feita uma comparação dos valores de velocidade de mínimo jorro simulada, calculada e o valor experimental conforme mostra a Tabela 3.11.

Tabela 3.11– Comparação entre valores simulados e experimentais de V_{min} para Cond. 3

	Valores Experimentais	CFD	Eq. 3.41 Olazar (2001)
V_{min} (m/s)	26,70	22,50	29,7
Desvio relativo		15,73	11,20

A Tabela 3.12 faz uma comparação entre os valores de queda de pressão de jorro mínimo simulada, calculada e experimental.

Tabela 3.12– Comparação entre valores simulados e experimentais de ΔP_{smin} para Cond. 3

	Valores Experimentais	CFD	Eq. 3.42 Olazar (2001)
$\Delta P_{smin}(\text{Pa})$	2532,00	2576,30	2436,44
Desvio relativo		1,75	3,77

Note que o erro relativo tanto para V_{min} quanto ΔP_{smin} simulados via CFD apresentaram um desvio da mesma ordem de grandeza dos desvios obtidos pelas Equações (3.41) e (3.42), respectivamente. Verifica-se ainda que para o caso da queda de pressão o erro obtido pela simulação via CFD foi inferior ao obtido pela correlação de Olazar (2001).

Portanto, a simulação via CFD baseada no Modelo Euleriano Multifásico Granular permite prever com uma boa aproximação a condição de jorro mínimo do leito cônico nas condições estudadas por Olazar (2001).

3.6 – Estudo do Formato de Jorro e do Diâmetro Médio de Jorro

O fato de que em um leito em regime de jorro estável, a região de jorro assume um formato estável, indica a existência de um estado de equilíbrio dinâmico entre as forças presentes na interface jorro-anular. Observações sobre o formato do jorro geralmente são feitas usando leitos semi-circulares ou bidimensionais com paredes de acrílico. Uma variedade de formatos do jorro em diferentes condições experimentais está ilustrada na Figura 3.45, conforme descrito por MATHUR e EPSTEIN (1974). Segundo MIKHAILIK (1966) o formato do jorro obtido em leitos bidimensionais para uma grande variedade de materiais sólidos possui um comportamento muito similar ao de um leito convencional.

O formato do jorro referente ao item (a) da Figura 3.45 é o mais comum independente da geometria do leito ou condições operacionais.

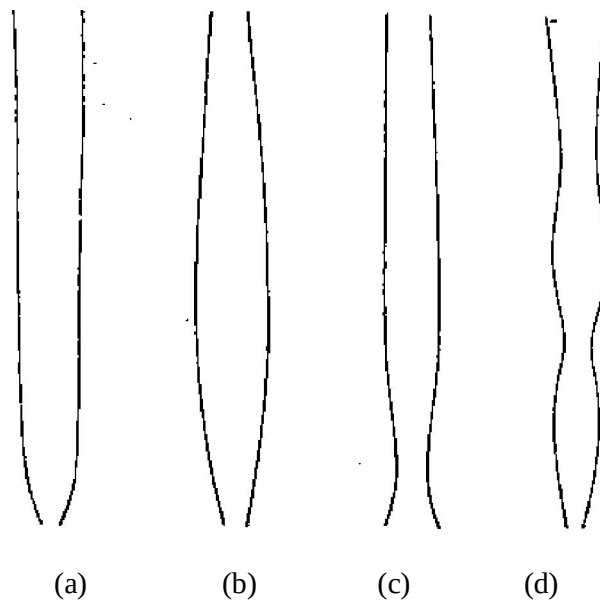


Figura 3.45 – Principais formatos de jorro segundo MATHUR e EPSTEIN (1974)

Procurou-se então obter por simulação esses formatos da região de jorro. A Figura 3.46 apresenta os resultados obtidos por CFD, para as condições descritas na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Geometrias usadas na simulação dos itens a, b, c e d da Figura 3.46

	D_c (m)	D_i (m)	θ	H_e (m)	ε	ρ_s (Kg/m ³)	d_s (mm)
a	0,152	0,0125	60°	0,635	0,370	1376	3,2
b	0,360	0,063	45°	0,20	0,360	2420	4,0
c	0,210	0,035	60°	0,150	0,370	1173	6,0
d	0,610	0,102	60°	1,220	0,37	1376	3,2

Observa-se nessa figura os mesmos formatos clássicos apresentados na literatura (Figura 3.45).

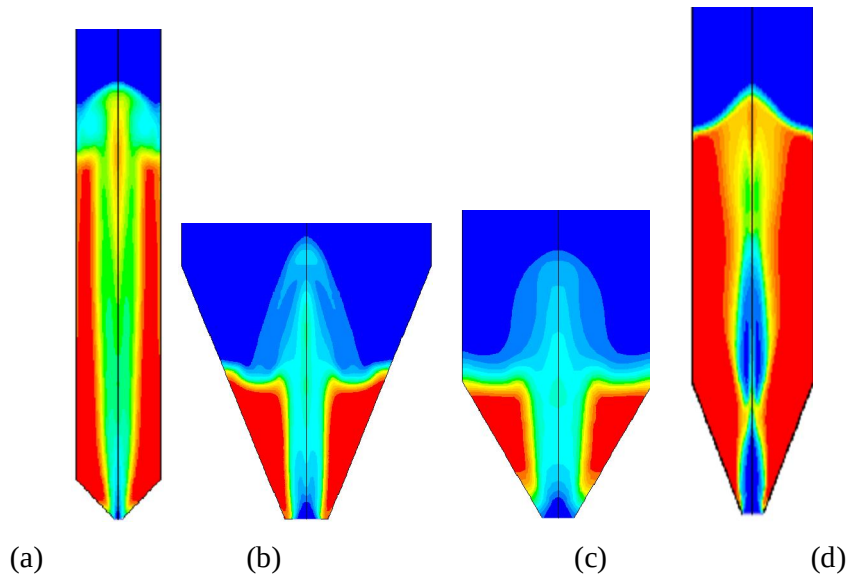


Figura 3.46 – Formatos de jorro obtidos na simulação com CFD

Uma outra informação importante e que está diretamente relacionada ao formato do jorro é o diâmetro médio de jorro. Algumas equações empíricas correlacionam o diâmetro médio de jorro com base em várias medidas ao longo do jorro. No entanto, alguns estudos como o de MALEK *et al.* (1963) mostraram que os diâmetros de jorro medidos em vários níveis a partir da base variam em torno de 10% ao longo da região de jorro.

Nesta etapa do trabalho foi feito o cálculo do diâmetro médio de jorro e os resultados obtidos na simulação foram comparados com os fornecidos pelas seguintes correlações:

- MALEK *et al.* (1963)

$$D_s = \left[0,115 \log_{10} (D_c - 0,031) Q_g^{0,5} \right] \quad (3.43)$$

- MIKHAILIK (1966)

$$D_s = 10 \left[0,115 \log_{10} (D_c - 0,031) \right] \left(\frac{Q_g}{\rho_s} \right)^{0,5} \quad (3.44)$$

- MCNAB (1972)

$$D_s = \left(\frac{0,037 Q_g^{0,49} D_c^{0,68}}{\rho_b^{0,41}} \right) \quad (3.45)$$

Os valores de diâmetro médio de jorro simulados foram obtidos seguindo as geometrias destacadas na Tabela 3.5. A Tabela 3.14 apresenta os valores simulados de diâmetro médio de jorro, D_s , e os valores calculados usando as Equações (3.43, 3.44 e 3.45). Constan ainda nesta tabela os valores dos desvios entre o valor simulado e o calculado pelas correlações supracitadas.

Tabela 3.14 - Valores de diâmetro médio de jorro simulados (CFD) e calculados por correlações da literatura para diferentes alturas de leito estático

<i>He</i>	Q_g (Kg/s)	D_s (m)	MALEK (1963) Eq. (3.43)		MIKHAILIK (1966) Eq. (3.44)		MCNAB (1972) Eq. (3.45)	
			D_s (m)	desvio(%)	D_s (m)	desvio(%)	D_s (m)	desvio(%)
15 cm	0,028	0,047	0,046	2,13	0,053	12,77	0,042	10,64
	0,031	0,042	0,048	14,29	0,056	33,33	0,044	4,76
	0,034	0,045	0,050	11,11	0,059	31,11	0,046	2,22
	0,037	0,042	0,053	26,19	0,061	45,24	0,048	14,29
	0,040	0,046	0,054	17,39	0,064	39,13	0,049	6,52
	0,047	0,048	0,059	22,92	0,069	43,75	0,053	10,42
19 cm	0,037	0,049	0,053	8,16	0,061	24,49	0,048	2,04
	0,040	0,051	0,054	5,88	0,064	25,49	0,049	3,92
	0,044	0,055	0,057	3,64	0,067	21,82	0,052	5,45
	0,047	0,052	0,059	13,46	0,069	32,69	0,054	3,85
	0,050	0,053	0,061	15,09	0,071	33,96	0,055	3,77
	0,053	0,054	0,063	16,67	0,074	37,04	0,057	5,56
22 cm	0,047	0,055	0,059	7,27	0,069	25,45	0,054	1,82
	0,050	0,054	0,061	12,96	0,071	31,48	0,055	1,85
	0,053	0,057	0,063	10,53	0,074	29,82	0,057	0,00
	0,056	0,055	0,065	18,18	0,076	38,18	0,058	5,45
	0,059	0,059	0,066	11,86	0,078	32,20	0,060	1,69
	0,062	0,063	0,068	7,94	0,079	25,40	0,061	3,17
25 cm	0,050	0,057	0,061	7,02	0,071	24,56	0,055	3,51
	0,053	0,056	0,063	12,50	0,074	32,14	0,057	1,79
	0,056	0,059	0,065	10,17	0,076	28,81	0,058	1,69
	0,059	0,062	0,066	6,45	0,078	25,81	0,060	3,23
	0,062	0,064	0,068	6,25	0,079	23,44	0,061	4,69
	0,065	0,065	0,070	7,69	0,081	24,62	0,063	3,08
média			11,50		média	30,10	média	4,40

Os valores de diâmetro médio de jorro simulados mostrados na Tabela 3.14 foram obtidos através da análise das Figuras que estão apresentadas no Anexo 5. Neste anexo pode se identificar o contorno do jorro e também os valores do diâmetro do jorro nos diferentes níveis.

Nota-se através da Tabela 3.14 que os valores simulados apresentaram um desvio médio da ordem de 4 % em relação a correlação de McNAB (1972). A correlação que apresentou o maior desvio foi a de MIKHAILIK (1966) sendo este da ordem de 30%. Portanto, a metodologia utilizada nesta tese também se mostra como uma boa alternativa para o cálculo do diâmetro médio de jorro.

3.7 – Velocidade da Partícula nas Zonas de Aceleração e Desaceleração da Região de Jorro

Conforme descrito por MATHUR e EPSTEIN (1974), na região de jorro uma partícula inicia o seu movimento a partir da base, onde acelera até atingir um valor máximo de velocidade. Após atingir o pico de velocidade, a partícula então desacelera até atingir o valor de velocidade nula, no topo da fonte, onde a mesma, então, inverte a direção e o sentido de seu movimento. Com base nisso, a região de jorro pode ser considerada como sendo formada por três zonas sucessivas, correspondendo às regiões de aceleração da partícula (zona I), subsequente desaceleração da partícula (zona II) e região final de desaceleração na fonte (zona III), respectivamente. Estas três zonas estão ilustradas na Figura 3.47 (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

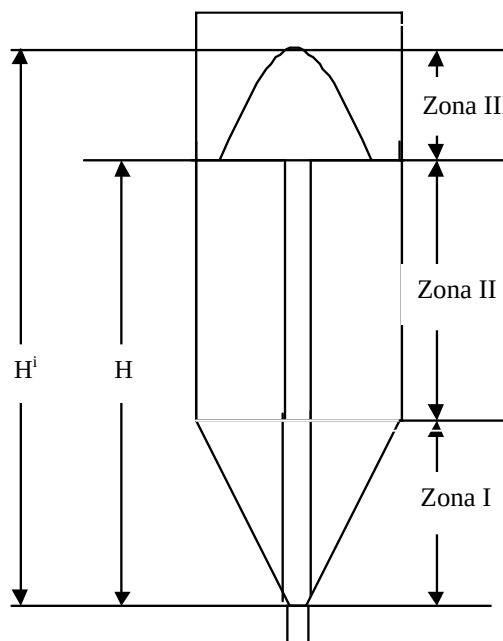


Figura 3.47 – Esquema para regiões de aceleração das partículas em um Leito de Jorro.

A Tabela 3.15 mostra as condições e geometrias adotadas por MATHUR e EPSTEIN (1974) para estudar as zonas de aceleração e desaceleração na região de jorro.

Tabela 3.15: Condições e geometrias adotadas por MATHUR e EPSTEIN (1974)

D_i (m)	D_c (m)	H_e (m)	θ	ρ_s (Kg/m ³)	d_s (m)	α_s
0,0125	0,152	0,635	60°	1376 (trigo)	0,0032	0,63

Adotando as condições da Tabela 3.15 e uma vazão de ar de jorro de 73,81 m³/h foi possível simular o perfil de velocidade de partículas na região central do jorro. A Figura 3.48 refere-se ao perfil de velocidade de partículas sendo os pontos os valores experimentais obtidos por MATHUR e EPSTEIN (1974) e a curva a simulação obtida em CFD. Nota-se uma boa aproximação entre os valores experimentais e os obtidos pela simulação. As três zonas características de aceleração da partícula puderam ser identificadas pela simulação conforme demonstra as linhas pontilhadas.

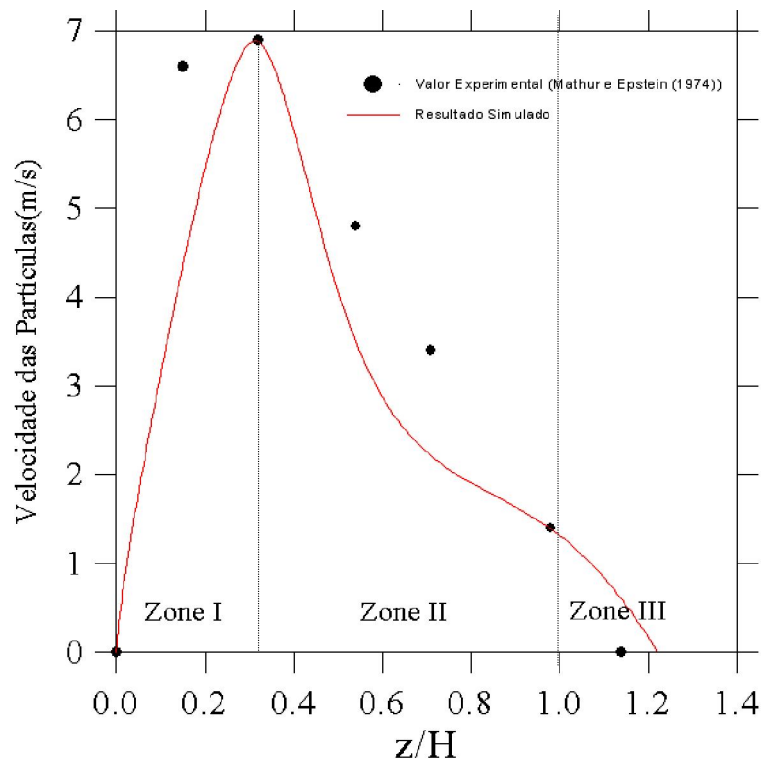


Figura 3.48 – Perfil longitudinal de velocidade de partícula.

Neste capítulo, foram apresentados os resultados de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD, usando o modelo Euleriano granular multifásico, com as respectivas

verificações experimentais. Os resultados e análises realizadas serviram de embasamento para a utilização do leito de jorro como inoculador de sementes de soja, conforme será apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

ESTUDOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO REVESTIMENTO DE SOJA

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda os estudos sobre revestimento de soja em diferentes equipamentos e a simulação numérica da cinética de crescimento da camada de recobrimento em leito de jorro. Estes estudos serão apresentados conforme a seqüência abaixo:

Estudos Experimentais:

- Revestimento de sementes de soja em leito de jorro;
- Revestimento de sementes de soja na Máquina de inoculação Bandeirante;
- Revestimento de sementes de soja na Máquina de inoculação Syngenta;
- Determinação do Índice de Dispersão;

Estudos de Simulação Numérica:

- Desenvolvimento do estudo de cinética de crescimento da camada de revestimento de semente de soja (revestida em leito de jorro) utilizando um modelo de Balanço Populacional;

4.1.1 – Revestimento de Sementes de Soja em Leito de Jorro

4.1.1.1 – Sementes

Os experimentos de revestimento com micronutrientes e inoculante foram realizados em sementes de soja da variedade Vencedora, cujas propriedades físicas estão mostradas na Tabela 4.1 e que estão relacionadas à forma de atuação das forças gravitacional, de empuxo e de arraste sobre cada partícula.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas das sementes de soja variedade VENCEDORA.

Propriedades	ρ_s (kg/m ³)	ϕ	$\bar{d}_p$ (m)
Valor	$1,17 \times 10^3$	0,9	6×10^{-3}

4.1.1.2 – Micronutrientes

Os micronutrientes Cobalto e Molibdênio foram adicionados junto com a mistura recobridora. Estes micronutrientes atuam de forma intensiva na nodulação das raízes da planta, favorecendo o processo de fixação de Nitrogênio. Os micronutrientes supracitados foram encontrados no produto comercial ‘Nódulus’ (Figura 4.1), na proporção de 1% e 10%, respectivamente, sendo o restante do produto composto por outras substâncias como enxofre, cálcio e ferro.



Figura 4.1 – Produto comercial utilizado como fonte de micronutrientes Mo e Co.

O inoculante apresentado na Figura 4.1 é usado apenas no revestimento de sementes em leito de jorro, já que nas Máquinas de inoculação Bandeirantes e Syngenta, que serão apresentadas na sequência foi utilizado micronutriente PROFOL-CoMol na forma líquida. O micronutriente na forma líquida possui a mesma composição correspondente ao micronutriente em pó citado anteriormente.

4.1.1.3 – Inoculante

O inoculante contendo bactérias liofilizadas do tipo *Bradyrhizobium*, utilizado no revestimento de sementes em leito de jorro foi o da marca “Emerge Pó – molhável”, produzido pela Milenia Agrociencias S.A.. Este produto é vendido em frascos contendo 20 g de bactérias desidratadas como apresentado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Produto comercial utilizado como fonte de Inoculante.

4.1.1.4 – Esquema da Unidade Experimental de Inoculação em Leito de Jorro

A unidade experimental de recobrimento de sementes em leito de jorro está localizada no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) e seus detalhes são mostrados na Figura 4.3.

As relações geométricas do leito de jorro com tubo draft utilizado nesta fase do trabalho, foram definidas pelos resultados obtidos nos estudos fluidodinâmicos apresentados no Capítulo 3. Como destacado nas simulações do item 3.5.1, um leito com a relação $D_c/D_i = 6$ e distância do tubo draft à base de 4cm seria uma configuração mais indicada para os estudos experimentais de revestimento de sementes de soja.

Na unidade experimental, o ar era impulsionado por um soprador de 7,5 cv (1) e sua vazão ajustada com o auxílio de válvulas do tipo gaveta instaladas na linha e em um *by-pass* (2). O ar era aquecido por resistências elétricas (3), conectadas a um variador de voltagem (4). O ajuste da temperatura era feito com o auxílio de um trocador de calor de tubo duplo (5). Um tubo de Pitot (6) calibrado com um anemômetro de fio quente era utilizado para a medida da vazão do ar de jorro. A medida da queda de pressão do Pitot era feita através de um micromanômetro digital (7). A temperatura do ar era medida usando um termopar de cobre constantan (8) localizado na entrada do leito de jorro (9). O leito de jorro foi construído em aço inoxidável com as seguintes dimensões: diâmetro da parte cilíndrica 0,21m, diâmetro da base 0,035m e ângulo do cone de 60°. O equipamento possuía uma janela de vidro (10) para a visualização do jorro e do sistema de atomização. O bico atomizador era posicionado acima da fonte. Um tubo Draft foi utilizado para evitar o curto-circuito de sementes durante o revestimento.

O dispositivo completo de atomização também está mostrado em detalhe (14) na Figura 4.3. A suspensão com micronutrientes e inoculante usada no recobrimento era homogeneizada por um agitador magnético (12). Esta mistura recobridora era alimentada no bico atomizador pneumático de duplo fluido por uma bomba peristáltica (13), sendo adicionada ao leito na

forma de um “spray”, em contracorrente com o escoamento do ar de jorro. A vazão do ar de atomização era regulada por uma válvula tipo agulha e medida por um rotâmetro (15).

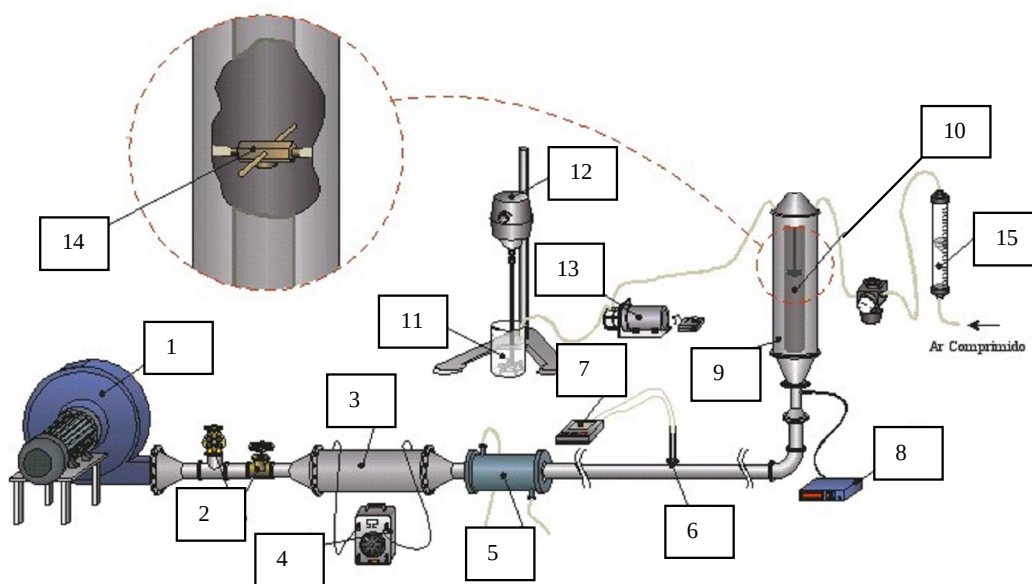


Figura 4.3 – Esquema da unidade experimental com a atomização para o revestimento de sementes de soja.

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1–Soprador de ar | 9–Leito de jorro |
| 2–Válvulas do tipo gaveta | 10–Janela de vidro |
| 3–Aquecedor elétrico | 11–Reservatório da Suspensão recobridora |
| 4–Variador de voltagem | 12–Agitador magnético |
| 5–Trocador de Calor de Tubo Duplo | 13–Bomba peristáltica |
| 6–Tubo Pitot | 14– Bico Atomizador de duplo fluido |
| 7–Micromanômetro digital | 15– Rotâmetro |
| 8–Termopar de cobre–constantan | |

4.1.1.5 – Preparo da Mistura Recobridora

O material recobridor das sementes era preparado na forma de uma suspensão aquosa de micronutrientes e inoculantes aquecida e mantida a uma temperatura de 39°C. A concentração da suspensão recobridora foi de 0,13 g de sólidos/ml de suspensão, sendo 95% dos sólidos de micronutrientes e 5% de inoculante. Os componentes da mistura recobridora eram pesados e misturados em água sob agitação em um béquer. Assim que a suspensão era preparada conectava-se a bomba peristáltica ao bico atomizador de duplo fluido, acionava-se a bomba, com a máxima vazão sem que o ar fosse alimentado ao bico, e assim transportava-se toda a

suspensão de um béquer para outro béquer de mesmo volume. Repetia-se este procedimento 5 vezes com o objetivo de eliminar as partículas maiores de micronutrientes, que quando alimentados a baixa vazão poderiam entupir o bico durante a operação de revestimento. Em seguida, era feita a calibração da bomba peristáltica num total de três réplicas, para cada vazão volumétrica desejada. O aspecto final da suspensão recobridora pode ser observado na Figura 4.4.

Comumente, em suspensões recobridoras, são adicionados ligantes para aumentar a adesão do recobrimento às partículas, porém neste trabalho, devido às características adesivas da suspensão recobridora utilizada não foi necessária esta adição.



Figura 4.4 – Mistura recobridora.

4.1.1.6 – Operação

Depois de preparada a suspensão recobridora, o bico atomizador era fixado na parte superior do leito a aproximadamente 5 cm da fonte e posicionado em uma posição radial intermediária da parte cilíndrica do leito. DUARTE (2002) mostrou que quando o bico era posicionado a uma distância de $0,66R$ a partir do centro (sendo R o raio da parte cilíndrica do leito), obtinha-se uma maior eficiência no repasse da suspensão. A Figura 4.5 apresenta o bico de duplo fluido de mistura externa utilizado para promover a atomização da suspensão no interior do leito.



Figura 4.5 – Bico atomizador de duplo fluido.

A operação de revestimento das sementes de soja em leito de jorro era iniciada com a partida do soprador, estando a coluna de jorro vazia. O variador de voltagem era ligado e regulado de modo que o sistema de resistência elétrica aquecesse o ar de jorro até a temperatura desejada. Uma vez atingida esta temperatura, o trocador de calor de tubo duplo conectado a um reservatório contendo água fria e alimentado por uma bomba de 1,5 cv era acionado, de forma a manter esta temperatura constante.

O ar comprimido, que promovia a atomização da suspensão recobridora, era ajustado para a vazão de operação definida pelo planejamento fatorial, com o auxílio de um rotâmetro. A pressão do ar de atomização variou entre 1 e 3 atm, dependendo da vazão de ar utilizada. A massa de sementes de soja era pesada e depois descarregada na coluna de jorro. Para que o jorro se mantivesse estável durante toda a operação e para que a carga de sementes ocupasse toda a parte cônica e uma parte da porção cilíndrica do leito, foi utilizada uma quantidade de 2,5 kg de sementes (altura de leito estático de 18 cm).

Após as sementes serem adicionadas ao leito, a bomba peristáltica, previamente calibrada, era acionada. A vazão do ar de jorro era ajustada ao valor definido no planejamento experimental. O tempo de recobrimento era iniciado no momento em que a suspensão era pulverizada no interior do leito.

A operação de recobrimento prosseguia durante o tempo de 20 minutos, havendo o cuidado de manter em níveis constantes a vazão de ar de jorro, a vazão do ar comprimido para atomização e a temperatura de entrada do ar de jorro. Um cuidado adicional utilizado nos ensaios é o de observar se o jato de spray estava apresentando alguma direção preferencial, o que era indesejável; o ideal era que a nuvem de partículas pulverizadas tivesse o formato de um cone e que este fosse o mais uniforme e alinhado possível.

Findo o tempo estabelecido de revestimento, eram ao mesmo tempo desligados o soprador, a bomba peristáltica e o ar comprimido. As sementes recobertas eram descarregadas e submetidas à análise de eficiência e de distribuição de massa de revestimento.

4.1.1.7 – Cálculo da Eficiência de Recobrimento Experimental

A Equação (4.1) foi utilizada para a determinação da eficiência do processo. Essa equação expressa a razão entre a massa total de sólido seco aderido às sementes (m_{trec}) e a massa total repassadas a elas.

$$\eta(\%) = \frac{m_{trec}}{V_{Sus} \cdot t \cdot C_S} \times 100 \quad (4.1)$$

onde V_{sus} representa a vazão volumétrica da suspensão, t o tempo de processo (recobrimento) e C_s a concentração em peso de sólidos na suspensão recobridora.

O procedimento adotado para determinar a massa total de revestimento seco m_{trec} , seguiu as seguintes etapas. Primeiramente era pesada a massa total final de sementes revestidas no processo, e era feita uma retirada aleatória de 50% de massa de sementes revestidas. Em seguida estas sementes eram colocadas em um reservatório de 3 litros contendo 1 litro de água. O reservatório era então fechado e promovia-se uma agitação manual em torno de 1 minuto. Feito isto, uma tela de aberturas muito estreitas era colocada na boca do galão de forma a retirar todo o líquido do interior, sem retirar as sementes. Esta suspensão era levada a uma estufa a 105°C e ali permanecia durante 24 horas; assim toda a água era evaporada e o revestimento seco correspondente àquela amostra era obtido. Com o valor desta massa de revestimento seco era então estimada a massa total de revestimento e então determinada a eficiência com base na Equação (4.1).

Como mencionado anteriormente, um dos objetivos deste trabalho foi o de comparar a qualidade do revestimento de sementes de soja recoberta em leito de jorro com aquelas revestidas em máquinas de tratamento adotadas no campo. O mecanismo adotado para mensurar a qualidade deste revestimento foi a homogeneidade do revestimento, obtidos nos diferentes processos adotados neste estudo. A seguir é mostrada a metodologia adotada em cada uma das máquinas de tratamento de sementes, que são usadas por grande parte dos produtores de soja no Brasil.

4.1.2 – Revestimento de Sementes de Soja na Máquina de Inoculação Bandeirantes

4.1.2.1 – Esquema da Unidade Experimental

A unidade experimental de recobrimento com a máquina de inoculação Bandeirantes, gentilmente cedida pela empresa ABC-A&P e instalada no Laboratório de Sistemas Particulados (FEQUI/UFU) é apresentada na Figura 4.6.

Os números destacados na figura dizem respeito a:

1. Compartimento para alimentação das sementes a serem revestidas;
2. Compartimento para alimentação do fungicida na forma líquida ;
3. Compartimento para alimentação dos micronutrientes molibdênio e cobalto na forma líquida;
4. Compartimento para alimentação do inoculante (bactéria) em pó;
5. Rosca sem fim com rotação fixa;
6. Recipiente de coleta das sementes revestidas.



Figura 4.6 – Máquinas de inoculação Bandeirantes

As sementes eram alimentadas no compartimento (1), a rosca sem fim (5) era acionada e então as sementes percorriam toda a sua extensão; ao longo do trajeto eram adicionados às sementes o fungicida no compartimento (2), os micronutrientes no compartimento (3) e o inoculante no compartimento (4). Finalmente as sementes eram coletadas no coletor (6) conectado à saída da máquina.

4.1.2.2 – Procedimento Experimental

Conforme descrito no item anterior, na máquina Bandeirantes o material recobridor era colocado separadamente nos respectivos compartimentos. A quantidade de material recobridor foi definida segundo um planejamento fatorial em dois níveis.

Vale destacar primeiramente que os compartimentos (2, 3 e 4) possuíam um sistema interno de ajuste de vazão através de copos dosadores. Com relação ao compartimento (1) a vazão é ajustada através da abertura ou fechamento do bocal de alimentação da rosca situado no fundo do compartimento. Antes de iniciar cada experimento o primeiro passo era ajustar as vazões dos respectivos compartimentos, segundo o planejamento fatorial adotado. Posteriormente eram adicionados o fungicida, os micronutrientes e o inoculante em seus respectivos compartimentos (1, 2, 3 e 4).

A operação de revestimento das sementes de soja era iniciada com o acionamento do motor da rosca sem fim, as sementes eram então transportadas ao longo da rosca, onde recebiam o material recobridor, sendo coletadas na saída da máquina. Com o intuito de reproduzir exatamente o procedimento adotado no campo, não era adotada uma etapa de secagem das sementes após o revestimento.

4.1.3 – Revestimento de Sementes de Soja na Máquina de Inoculação Syngenta

4.1.3.1 – Esquema da Unidade Experimental

A unidade experimental de recobrimento com rosca sem fim e dispositivo de atomização (Máquina Syngenta) foi gentilmente cedida pela empresa ABC-A&P e instalada no Laboratório de Sistemas Particulados da FEQUI/UFU. A máquina Syngenta é apresentada na Figura 4.7.

Os números destacados na figura dizem respeito a:

1. Compartimento para alimentação das sementes a serem revestidas;
2. Compartimento contendo o atomizador;
3. Quadro de força;
4. Descarga das sementes revestidas;
5. Rosca sem fim com rotação fixa;
6. Compartimento para alimentação da suspensão recobridora.

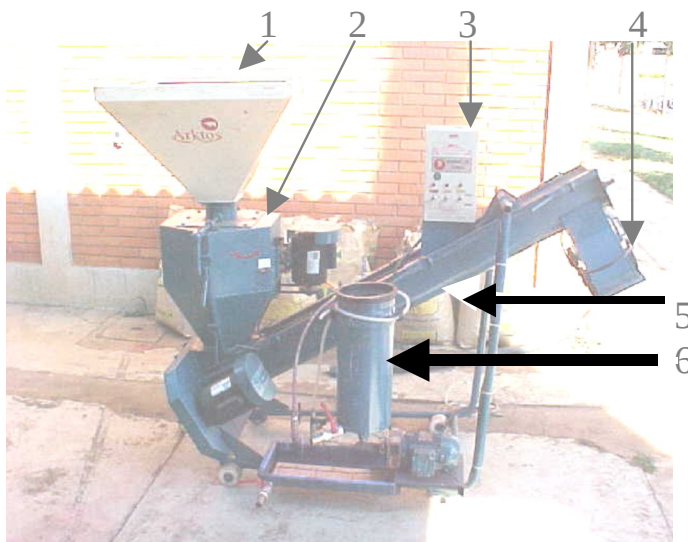


Figura 4.7 – Máquinas de inoculação Syngenta.

Através do quadro de forças (3) eram acionados o atomizador no interior do compartimento (2), a alimentação de suspensão (6) e a rosca sem fim (5). Na sequência era aberta a alimentação de sementes no compartimento (1), estas sementes então caíam por gravidade passando pelo compartimento (2) onde entravam em contato com a suspensão atomizada; em seguida estas se depositavam sobre a rosca sem fim (5) e eram transportadas até a descarga da máquina (6) onde eram coletadas.

4.1.3.2 – Procedimento Experimental

Nesse equipamento o material recobridor era colocado no compartimento (6), o qual possuía um controlador de vazão. Cabe ressaltar que este equipamento só permite a utilização de componentes na forma líquida (micronutrientes e inoculante). A mistura recobridora era composta de fungicida, inoculante e micronutrientes, a base de molibdênio e cobalto. A composição da mistura foi definida segundo um planejamento fatorial do tipo composto central.

Vale destacar, que o compartimento (6) possuía um sistema de ajuste de vazão. Com relação ao compartimento (1) a vazão era ajustada através da abertura ou fechamento da boca de alimentação, situada no fundo do compartimento. Antes de iniciar cada experimento o primeiro passo era ajustar as vazões de soja e suspensão alimentadas, seguindo o planejamento experimental adotado. Posteriormente eram adicionadas as sementes e a suspensão, em seus respectivos compartimentos (1) e (6).

A operação de revestimento das sementes de soja era iniciada com a partida do atomizador, seguido da alimentação de suspensão e do acionamento da rosca sem fim. Por último, era iniciada a alimentação de sementes a serem revestidas. Uma vez iniciado o processo, as sementes eram revestidas e imediatamente coletadas na saída da Máquina. Assim como no revestimento feito na Máquina Bandeirantes, não foi adotada uma etapa de secagem das sementes após o revestimento, com o intuito de reproduzir o procedimento adotado no campo.

4.1.4 – Determinação da Massa de Revestimento das Sementes

Após cada experimento nos diferentes processos de revestimento supracitados (jorro e máquinas de tratamento), uma amostra de 100 sementes revestidas eram aleatoriamente separadas e pesadas individualmente em uma balança de quatro dígitos (precisão de $1,0 \times 10^{-4}$ g).

Em seguida era retirado o revestimento de cada semente com um algodão levemente úmido. Após a retirada do recobrimento pesava-se novamente cada semente sem o revestimento. A massa de revestimento de cada semente era obtida pela diferença entre a massa de semente revestida e sem revestimento.

Cabe ressaltar que foi realizado um teste em branco para verificar se o procedimento utilizado para retirada do revestimento não interferiria na massa da semente. Para tal, separou-se 25 sementes *in natura*, pesou-se cada semente e então foi feita uma simulação da retirada de revestimento das sementes com algodão úmido; após a simulação efetuou-se a pesagem de todas as sementes novamente e então verificou -se a aplicabilidade deste procedimento.

4.1.5 – Estudo da Heterogeneidade da Distribuição de Massa de Revestimento

Como abordado no Capítulo 2, a Equação (2.8) do modelo de balanço populacional a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho, considera nulos os termos de fragmentação e aglomeração e possui como mecanismo único, o crescimento por camada, identificado pelo termo convectivo G , que é dependente do tamanho da partícula. A Figura 4.8 refere-se a uma distribuição típica de massa de recobrimento em função da massa de sementes *in natura* obtida no revestimento em leito de jorro.

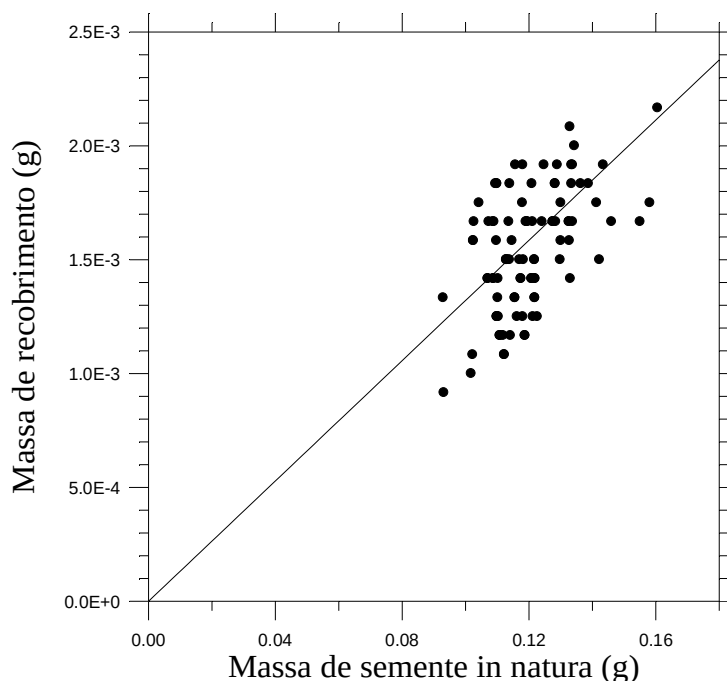


Figura 4.8 – Massa de recobrimento versus massa semente *in natura* correspondente.

Nota-se que duas sementes de mesma massa *in natura* podem possuir diferentes massas de recobrimento. Portanto, faz-se necessário minimizar o efeito das variáveis que possam contribuir para que as sementes de mesma massa cresçam diferentemente uma das outras, de forma a garantir que a diferença entre a quantidade de revestimento aderida à semente seja principalmente devido à diferença de massa entre elas.

Uma vez quantificado esta heterogeneidade é possível fazer uma análise mais completa entre os diferentes processos de revestimento adotados neste trabalho. Em função disso, foi definido o índice de dispersão, o qual será discutido na sequência.

4.1.5.1 – Determinação do Índice de Dispersão

Após ter sido feita a pesagem das sementes, com e sem o revestimento, pôde-se determinar como a massa de revestimento de cada semente se relaciona com a massa da semente *in natura*. Assim, um gráfico com o aspecto apresentado na Figura 4.9, pôde ser obtido. Com o intuito de quantificar a heterogeneidade de massa de revestimento, foi feito o cálculo do índice de dispersão, que foi definido como o valor médio entre o coeficiente linear das retas acima e abaixo da reta central, mostrada na Figura 4.9.

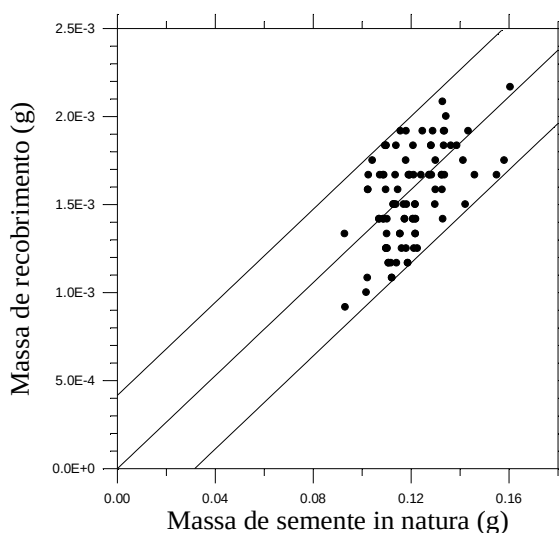


Figura 4.9 – Gráfico típico de uma distribuição de massa de revestimento e as retas que caracterizam o índice de dispersão.

A reta central era obtida pela regressão linear e obrigatoriamente passa pela origem, visto que, para uma semente de massa zero, tem-se zero de revestimento. As retas acima e abaixo são paralelas à reta intermediária e são obtidas de forma que tangenciem os pontos mais distantes da reta central, acima e abaixo, respectivamente. A geração destas retas e a

determinação do índice de dispersão correspondente foi feita por um algoritmo desenvolvido em MAPLE 7[®].

4.1.6 – Tratamento dos Dados e Condições Experimentais para o Leito de Jorro e as Máquinas Bandeirantes e Syngenta

O ideal em um processo de revestimento é que a distribuição de massa de revestimento seja a mais uniforme possível. Neste sentido ao se comparar o revestimento em leito de jorro com outros equipamentos é importante confrontar os valores de índice de dispersão obtidos entre eles. Com o objetivo de avaliar a influência de algumas variáveis importantes no índice de dispersão de um processo de inoculação, foi utilizado um planejamento fatorial de experimentos (BOX et al, 1978) e a técnica da superfície de resposta (MYERS, 1976) para os três equipamentos estudados (Máquinas Bandeirantes e Syngenta e o Leito de jorro). Assim pôde-se obter uma correlação entre as condições operacionais e o índice de dispersão. Uma vez obtidos os valores de índice de dispersão para as Máquinas Bandeirantes e Syngenta, estes foram comparados com os valores obtidos para o leito de jorro.

4.1.6.1 – Índice de Dispersão para o Leito de Jorro

As variáveis estudadas foram: vazão do ar de atomização, vazão do ar de jorro e vazão de suspensão recobridora. Em virtude do número de fatores estudados e a intenção de apresentar um modelo de equação preditiva de segunda ordem, foi adotado o planejamento composto central. Para esse caso, com três variáveis, o número total de experimentos é de 16, com a realização de 2 experimentos no ponto central.

A Tabela 4.2 mostra a matriz do planejamento obtida, apresentada na forma adimensional, para a situação desse trabalho. O valor de α adotado, foi aquele que conduz a uma matriz de variância e covariância diagonal e como consequência os parâmetros estimados não serão correlacionados entre si, ou seja, um planejamento composto central ortogonal (BOX et al, 1978). O valor de α encontrado foi de 1,764.

Os critérios de seleção da faixa de valores da vazão de ar de jorro foram baseados na obtenção de vazão mínima de ar, que mantivesse o jorro estável com sementes já recobertas, e a vazão máxima desse ar, que evitasse o arraste de sementes. Os níveis das demais variáveis, vazão de ar de atomização e vazão de suspensão, foram determinados com base no estudo de LUCAS (2000).

Tabela 4.2 – Matriz do planejamento de um **pcc** para três variáveis.

Experimento	X ₁	X ₂	X ₃	Id _{Ji}
1	1	1	1	Id _{J1}
2	-1	1	1	Id _{J2}
3	1	-1	1	Id _{J3}
4	-1	-1	1	Id _{J4}
5	1	1	-1	Id _{J5}
6	-1	1	-1	Id _{J6}
7	1	-1	-1	Id _{J7}
8	-1	-1	-1	Id _{J8}
9	0	0	0	Id _{J9}
10	0	0	0	Id _{J10}
11	1,764	0	0	Id _{J11}
12	-1,764	0	0	Id _{J12}
13	0	1,764	0	Id _{J13}
14	0	-1,764	0	Id _{J14}
15	0	0	1,764	Id _{J15}
16	0	0	-1,764	Id _{J16}

A adimensionalização (codificação) das variáveis independentes estudadas é apresentada na seqüência.

$$X_1 = \frac{V_{AJ} - 32,9}{2,5} \quad X_2 = \frac{V_{AT} - 1500}{400} \quad X_3 = \frac{V_{SP} - 15}{3} \quad (4.2)$$

Onde:

- V_{AJ} : valor da variável vazão do ar de jorro (L/s);
V_{AT} : valor da variável vazão do ar de atomização (L/h) e
V_{SP} : valor da variável vazão de suspensão (mL/min).

Obtidas as respostas do Índice de Dispersão para o jorro (Id_J) foi realizada uma regressão múltipla, para quantificar os efeitos das variáveis independentes.

Com os valores de **t** de Student obtidos da análise de variância da regressão, as variáveis cujos parâmetros relacionados possuem nível de significância superior a 5% foram eliminadas. A significância do modelo foi avaliada utilizando o quadrado do coeficiente de correlação múltipla e confirmada pela realização de um teste de hipótese com a distribuição **F**, bem como através de uma análise de resíduos.

Com a eliminação de todos os parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, foi então encontrada a equação preditiva para o índice de Dispersão Id_J . Essa equação permite avaliar os efeitos de cada variável na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência.

4.1.6.2 – Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes ($Idm1$)

Para os experimentos com a Máquina Bandeirantes foi realizado um planejamento fatorial em dois níveis (2^3). Os níveis de cada variável independente estudada estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Níveis utilizados no planejamento experimental da Máquina Bandeirantes

x_1	x_2	x_3	$Idm1_i$
1	1	1	$Idm1_1$
1	1	-1	$Idm1_2$
1	-1	1	$Idm1_3$
1	-1	-1	$Idm1_4$
-1	1	1	$Idm1_5$
-1	1	-1	$Idm1_6$
-1	-1	1	$Idm1_7$
-1	-1	-1	$Idm1_8$

Com a eliminação de todos os parâmetros não significativos e suas respectivas variáveis, por meio de uma regressão múltipla foi encontrada uma equação preditiva para o índice de dispersão. Essa equação, além de avaliar os efeitos de cada variável na resposta estudada, determinando assim a intensidade dessa influência, também permite que para a faixa de valores estudados, sejam encontradas as melhores condições de processo para se obter uma menor heterogeneidade do revestimento.

Na Tabela 4.3, x_1 representa a vazão mássica de sementes (Kg soja/min), x_2 a vazão de micronutrientes (mL/min) e x_3 a vazão de inoculante (g/min).

As Equações (4.3) a (4.5) apresentam, respectivamente, a codificação da vazão de sementes de soja (χ_1) e da vazão de suspensão (χ_2).

$$x_1 = \frac{V_{sem1} - 31,30}{3} \quad (4.3)$$

$$x_2 = \frac{V_{micrm1} - 290}{50} \quad (4.4)$$

$$x_3 = \frac{V_{inocm1} - 300}{100} \quad (4.5)$$

Onde:

V_{sem1} : valor da variável vazão de sementes de soja da Máquina Bandeirantes (Kg/min);

V_{micm1} : valor da variável vazão de micronutrientes da Máquina Bandeirantes (mL/min) e

V_{inocm1} : valor da variável vazão de inoculante da Máquina Bandeirantes (g/min).

4.1.6.3 – Índice de Dispersão para Máquina Syngenta (Idm2)

A Tabela 4.4 mostra a matriz do planejamento fatorial do tipo composto central adotada nos experimentos com a Máquina Syngenta, na forma adimensional. O valor de α adotado (1,41), foi aquele que conduz a um planejamento composto central ortogonal (BOX et al, 1978).

Tabela 4.4 – Matriz do planejamento experimental (forma codificada) Máquina Syngenta.

Exp.	χ_1	χ_2	Idm2 _i
1	-1	-1	Idm2 ₁
2	-1	1	Idm2 ₂
3	1	-1	Idm2 ₃
4	1	1	Idm2 ₄
5	0	0	Idm2 ₅
6	-1,41	0	Idm2 ₆
7	1,41	0	Idm2 ₇
8	0	-1,41	Idm2 ₈
9	0	1,41	Idm2 ₉
10	0	0	Idm2 ₁₀

Na Tabela 4.4, χ_1 representa a vazão mássica de sementes e χ_2 a vazão de suspensão. As Equações (4.6) e (4.7) apresentam, respectivamente, as equações de codificação da vazão de sementes de soja (χ_1) e da vazão de suspensão (χ_2).

$$\chi_1 = \frac{V_{sem2} - 35,45}{7,15} \quad (4.6)$$

$$\chi_2 = \frac{V_{susc2} - 740}{150} \quad (4.7)$$

Onde:

V_{sem2} : valor da variável vazão de sementes de soja da Máquina Syngenta (Kg/min), e

V_{susc2} : valor da variável vazão de suspensão da Máquina Syngenta (mL/min).

Assim como para outros equipamentos, por meio de uma regressão múltipla, foi encontrada uma equação preditiva para o índice de dispersão, em função das variáveis independentes estudadas na máquina Syngenta.

Como salientado no início deste capítulo, nesta etapa do trabalho foram realizados estudos experimentais e de simulação. O estudo de simulação refere-se à análise da cinética de crescimento da camada de revestimento de sementes de soja em leito de jorro. O desenvolvimento deste estudo foi feito com base no modelo de balanço populacional que é apresentado na seqüência.

4.1.8 – O uso do Modelo de Balanço Populacional no Estudo da Cinética de Revestimento de Soja em Leito de Jorro

Uma descrição detalhada sobre: o desenvolvimento da equação geral de balanço populacional, a discretização do sistema de equações diferenciais e a solução matemática adotada é encontrada no trabalho de Duarte (2002). A seguir será apresentada uma síntese da descrição do modelo e da metodologia de solução numérica.

O desenvolvimento da equação geral de balanço populacional é feita a partir da equação da continuidade. Para um pequeno elemento de volume arbitrário, o balanço de massa pode ser descrito por:

$$\text{Acúmulo} = \text{Geração líquida} \quad (4.8)$$

Desta forma,

$$\frac{d}{dt} \int_R \bar{\psi} dR = \int_R (\bar{B} - \bar{D}) dR \quad (4.9)$$

Onde os termos $\bar{B}$ e $\bar{D}$ referem-se respectivamente às taxas de aparecimento e de desaparecimento de novas partículas, dR é um elemento de área arbitrário e $\bar{\psi}$ é uma função densidade de distribuição genérica.

Como o interesse é estudar a distribuição da massa de recobrimento nas sementes, a propriedade $\bar{\psi}$ para este caso, é a função distribuição de massa de semente $Nf(m)$ e a coordenada de estado (ξ) é a massa de semente de soja. Assim temos que:

$$\frac{\partial}{\partial t} [Nf(m)] + \frac{\partial}{\partial m} [v_i Nf(m)] + \bar{D} - \bar{B} = 0 \quad (4.8)$$

A Equação (4.8) pode ser simplificada para o caso de revestimento de sementes de soja em leito de jorro, onde se tem apenas o crescimento por camadas (G), pois não existe

aglomeração ou fragmentação de partículas envolvidas neste processo, sendo conseqüentemente nulos os termos $\bar{D}$ e $\bar{B}$ desta equação.

$$\frac{\partial}{\partial t}(Nf(m)) = -\frac{\partial}{\partial m}(GNf(m)) \quad (4.10)$$

Como o interesse é determinar a variação da distribuição de massa de sementes com o tempo devido ao crescimento por camada, a Equação (4.9) pode ser discretizada pelo método de discretização de HOUNSLOW *et al.*, 1988, para o caso de crescimento dependente da massa:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{1}{m_i} (aG_{i-1}N_{i-1} + bG_iN_i + cG_{i+1}N_{i+1}) \quad (4.11)$$

Os coeficientes a , b e c são obtidos através da solução das equações dos momentos de ordem zero, um e dois (HOUNSLOW *et al.*, 1988).

Segundo DUARTE (2002) a taxa de crescimento na forma discreta pode ser escrita como:

$$G_i = \frac{\eta V_{sus} C_s}{\sum_{j=1}^{\infty} N_j m_j} \bar{m}_i \quad (4.12)$$

O algoritmo para solução da equação de modelo de balanço populacional foi totalmente desenvolvido no Sistema de Computação Algébrica Maple7[®] (em aproximadamente 1500 linhas de programação). As etapas adotadas na elaboração do programa, são apresentadas na seqüência:

- ✓ Entrada de dados;
- ✓ Cálculo do Índice de Dispersão (Id) da amostra;
- ✓ Determinação da menor (m_{min}) e da maior (m_{max}) massa de sementes *in natura* e divisão desta faixa em intervalos de massa;
- ✓ Determinação do N_i , número de sementes dentro de cada intervalo de massa;
- ✓ Determinação da massa média $\bar{m}_i$ dentro de cada intervalo;
- ✓ Determinação da taxa de crescimento G_i dentro de cada intervalo de massa;
- ✓ Determinação do sistema de equações dado pela Equação (4.11);
- ✓ Resolução do sistema de equações dado pela Equação (4.11);
- ✓ Determinação do parâmetro da taxa de crescimento K ;
- ✓ Determinação da massa de sementes e massa de revestimento simuladas;

- ✓ Cálculo dos desvios entre massa de semente revestida experimental e simulada;
- ✓ Cálculo dos desvios entre massa de revestimento experimental e simulada.

A solução do sistema de equações diferenciais de valor inicial descrito pela Equação (4.10) foi feita utilizando o método de Runge–Kutta de quarta e quinta ordem.

4.2 -RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2.1– Resultados do Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes

A Tabela 4.5 refere-se aos resultados experimentais obtidos, segundo a matriz de planejamento fatorial em dois níveis adotado para Máquina Bandeirantes, na forma não adimensional.

Tabela 4.5 – Matriz do planejamento experimental Máquina Bandeirantes

Exp.	Vazão mássica de sementes (Kg soja/min) (x_1)	Conc. de micronutrientes (mL/Kg soja) (x_2)	Conc. de inoculante (g/Kg soja) (x_3)	Idm1
1	34,3	340	400	0,00033
2	34,3	340	200	0,00037
3	34,3	240	400	0,00041
4	34,3	240	200	0,00029
5	28,3	340	400	0,00032
6	28,3	340	200	0,00023
7	28,3	240	400	0,00036
8	28,3	240	200	0,00010

4.2.1.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para Máquina Bandeirantes

A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos para a regressão múltipla dos valores dos índices de dispersão para Máquina Bandeirantes. Observa-se na Tabela 4.6, que todas as variáveis tiveram, de alguma forma, uma influência significativa no índice de dispersão.

Os resultados da Tabela 4.6, independente da variável analisada, mostram que na forma isolada, o aumento de cada variável provoca um aumento no índice de dispersão. Cabe ressaltar, que as variáveis vazão de sementes (x_1) e vazão de inoculante (x_3) influenciaram mais intensamente a heterogeneidade do recobrimento, do que a vazão de nutrientes (x_2). Observa-se também que existe interação entre todas as variáveis estudadas.

Tabela 4.6 – Resultados da regressão para os índices de dispersão.

Fator Codificado	Parâmetro	t de Student	Nível de significância
Constante	3,02E-04	246,67	2,5 E-03
x_1	5,05E-05	41,18	1,5 E-02
x_2	1,16E-05	9,43	6,7 E-02
x_3	5,36E-05	43,73	1,4 E-02
$x_1 x_2$	-1,00E-05	-8,18	7,7 E-02
$x_2 x_3$	-4,20E-05	-34,28	1,8 E-02
$x_1 x_3$	-3,40E-05	-27,75	2,3 E-02

$R^2=0,99$

A Figura 4.10 refere-se a curva de superfície de resposta obtida com base nos valores dos parâmetros da regressão para o índice de dispersão da Tabela 4.6. Esta superfície considera a variável x_2 em seu ponto central e mostra a variação do índice de dispersão em função da vazão de sementes (x_1) e da vazão de inoculante (x_3). Através desta figura percebe-se que o índice de dispersão aumenta com o aumento de x_1 e x_3 e tem um valor máximo em torno de $3,5 \times 10^{-4}$ e mínimo em torno de $1,8 \times 10^{-4}$. Este menor valor do índice de dispersão, é obtido quando os menores valores de vazão de sementes e de vazão de inoculante são usados.

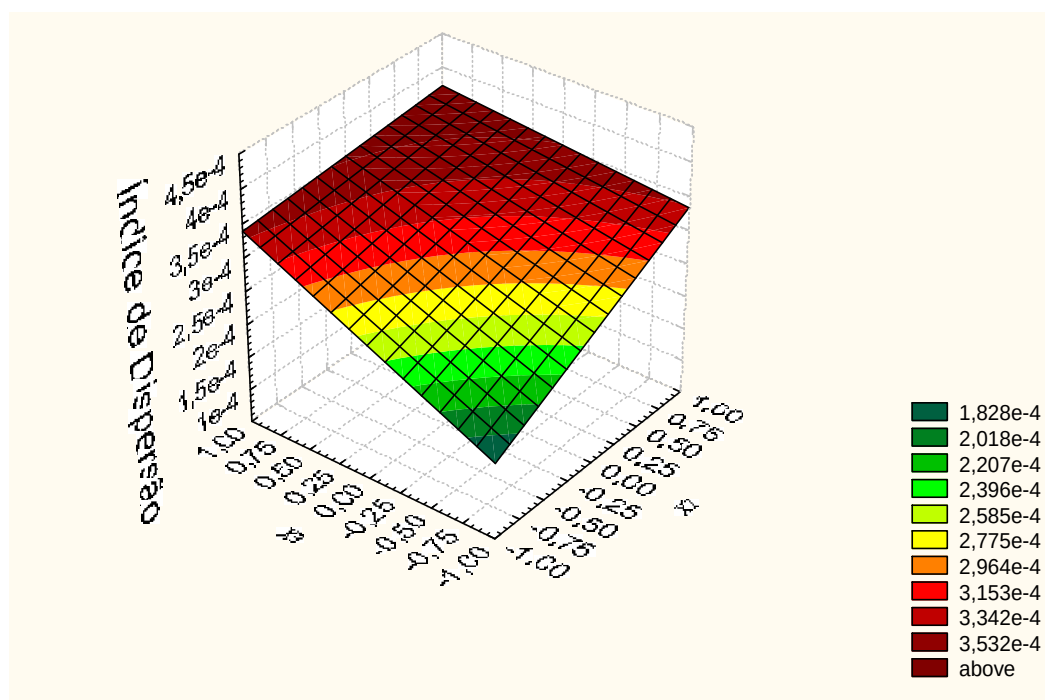


Figura 4.10 – Superfície resposta para o índice de dispersão para máquina Bandeirantes com $x_2=0$.

4.2.2– Resultados do Índice de Dispersão para Máquina Syngenta

A Tabela 4.7 refere-se aos resultados de índice de dispersão, dos experimentos realizados na máquina Syngenta, segundo a matriz do planejamento composto central.

Tabela 4.7 – Resultados do Índice de dispersão para a Máquina Syngenta.

Exp.	Vazão mássica de sementes (Kg soja/min)	Conc. de micronutrientes (mL/Kg soja)	Idm2
	χ_1	χ_2	
1	28,30	590,0	0,00012
2	28,30	890,0	0,00019
3	42,60	590,0	0,00031
4	42,60	890,0	0,00023
5	35,45	740,0	0,00020
6	25,40	740,0	0,00013
7	45,56	740,0	0,00027
8	35,45	527,9	0,00020
9	35,45	952,1	0,00021
10	35,45	740,0	0,00019

4.2.2.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para Máquina Syngenta

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para a regressão múltipla dos valores dos índices de dispersão para Máquina Syngenta.

Tabela 4.8 – Resultados da regressão para os índices de germinação.

Fator Codificado	Parâmetro	Nível de significância
Constante	2,05E-04	6,55E-11
χ_1	5,45E-05	1,39E-06
$\chi_1\chi_2$	-3,80E-05	1,59E-04
$R^2=0,97$		

A Figura 4.11 refere-se à curva de superfície de resposta obtida com base nos valores dos parâmetros da regressão para o índice de dispersão da Tabela 4.8.

A Figura 4.11 mostra que o índice de dispersão aumenta com o aumento de χ_1 e com a diminuição de χ_2 e tem um valor de previsão máximo em torno de $3,2 \times 10^{-4}$ e mínimo em torno de $0,82 \times 10^{-4}$. Percebe-se pela análise entre as superfícies de respostas das Figuras 4.10 e 4.11 que a máquina Syngenta apresenta um revestimento mais uniforme (menores índices de dispersão) quando comparada com a máquina Bandeirantes. Este fato pode ser explicado pelo fato de a máquina Syngenta possuir um sistema de atomização da suspensão, enquanto que na máquina Bandeirantes a suspensão é simplesmente gotejada sobre as sementes que percorrem o sistema de rosca sem fim.

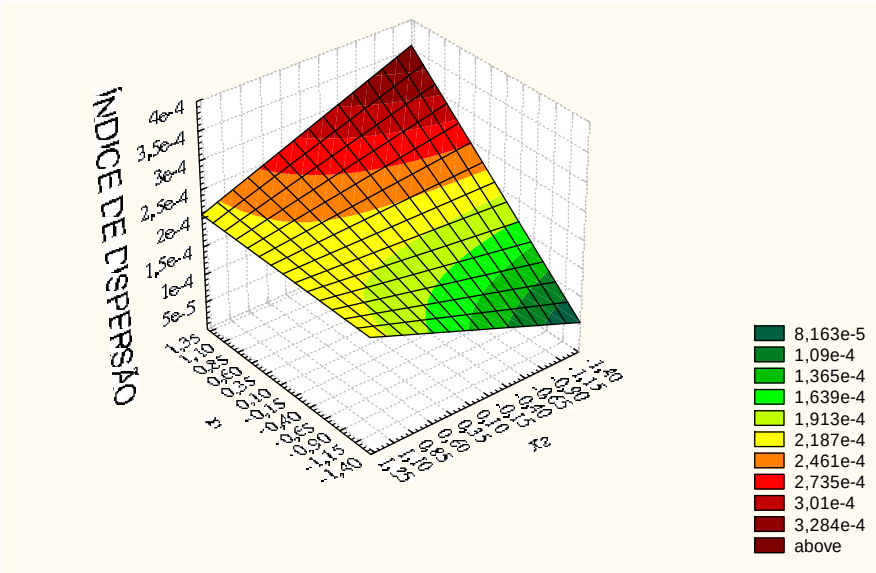


Figura 4.11 – Superfície resposta para o índice de dispersão para máquina Syngenta.

4.2.3– Resultados do Índice de Dispersão para o Leito de Jorro

A Tabela 4.9 mostra os resultados do índice de dispersão para o leito de jorro, segundo a matriz do planejamento composto central adotado.

Tabela 4.9 – Matriz do planejamento de um pcc para três variáveis.

Experimento	X ₁	X ₂	X ₃	Id _j
1	1	1	1	0,000128
2	-1	1	1	0,000140
3	1	-1	1	0,000105
4	-1	-1	1	0,000128
5	1	1	-1	0,000071
6	-1	1	-1	0,000080
7	1	-1	-1	0,000095
8	-1	-1	-1	0,000086
9	0	0	0	0,000096
10	0	0	0	0,000100
11	1,764	0	0	0,000091
12	-1,764	0	0	0,000106
13	0	1,764	0	0,000121
14	0	-1,764	0	0,000111
15	0	0	1,764	0,000131
16	0	0	-1,764	0,000060

4.2.3.1 – Análise de Regressão do Índice de Dispersão para o Leito de Jorro

A Tabela 4.10 apresenta os resultados da regressão, contendo apenas as variáveis e interações que influenciaram significativamente o índice de dispersão na inoculação em leito de jorro.

Observa-se nos resultados da Tabela 4.10, que de forma isolada a vazão do ar de atomização (X_2), não influenciou o índice de dispersão. Entretanto, quando observa-se as interações, todas as variáveis tiveram uma influência sobre a resposta.

Tabela 4.10– Resultados da regressão para os índices de dispersão do leito de jorro.

Fator Codificado	Símbolos	Parâmetro	Nível de significância
Constante	β_0	9,79E-05	1,77E-14
X_1	V_{AJ}	-4,4E-06	0,003843
X_3	V_{SP}	2,07E-05	6,88E-09
X_2X_2	V_{AT}^2	5,89E-06	0,000447
X_1X_2	$V_{AJ} V_{SP}$	-4,5E-06	0,017051
X_2X_3	$V_{AT} V_{SP}$	8,08E-06	0,000412
$R^2 = 0,975$			

A Figura 4.12 refere-se à curva de superfície de resposta obtida com base nos valores dos parâmetros da regressão para o índice de dispersão da Tabela 4.10. A superfície de resposta representada pela Figura 4.12 considera a variável X_2 em seu ponto central e mostra a variação do índice de dispersão em função da vazão de ar de jorro (X_1) e da vazão de suspensão (X_3). Através desta figura percebe-se que o índice de dispersão aumenta com o aumento de X_3 e diminui com o aumento de X_1 e tem um valor máximo em torno de $6,2 \times 10^{-5}$.

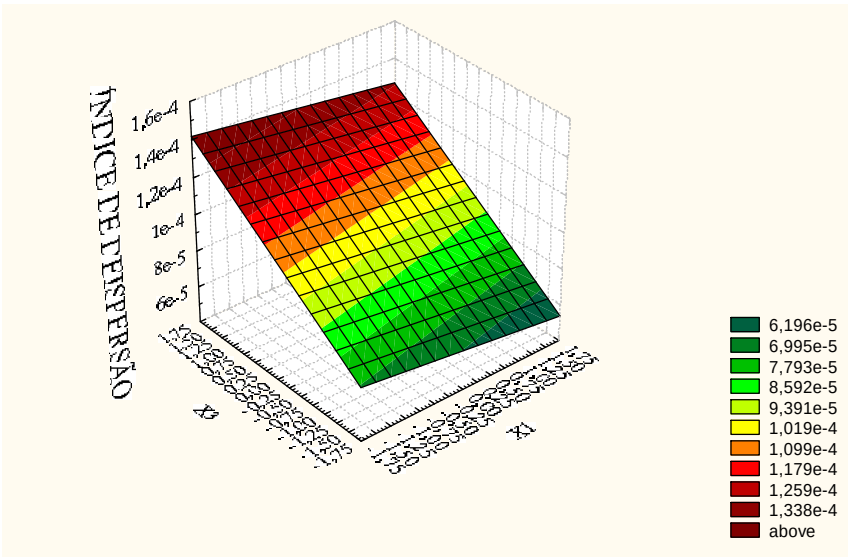


Figura 4.12 – Superfície de resposta para o índice de dispersão para o leito de jorro com $x_2=0$.

Uma análise importante que pode ser feita com base nas superfícies de resposta das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 é que o **maior** valor de índice de dispersão para o leito de jorro mostrou-se inferior aos **menores** valores obtidos para as máquinas Bandeirantes e Syngenta. O que confere ao leito de jorro uma melhor homogeneidade do revestimento quando comparado às máquinas Bandeirantes e Syngenta.

4.2.4 – Comparação entre o Índice de Dispersão para cada Equipamento

A Tabela 4.11 a seguir apresenta os valores médios experimentais de índice de dispersão para a Máquina Bandeirantes (Idm1), Syngenta (Idm2) e para o Leito de Jorro (Id_j). Note que o menor índice de dispersão foi obtido para o Leito de Jorro, seguido da Máquina Syngenta e por último a Máquina Bandeirantes. Portanto, dentre os três equipamentos estudados o Leito de Jorro é aquele que reveste com maior uniformidade.

Tabela 4.11 – Índice de Dispersão para os três equipamentos estudados.

Equipamento	Índice de Dispersão Médio
Máquina Bandeirantes (Idm1)	$3,02 \times 10^{-4}$
Máquina 2 (Idm2)	$2,05 \times 10^{-4}$
Leito de Jorro (Id _j) com Draft	$1,03 \times 10^{-4}$

4.2.5 – Característica do Revestimento nos Diferentes Equipamentos Estudados

LUCAS (2000), mostrou que a qualidade das sementes de soja, medida por meio dos índices de sementes não fissuradas, germinação e vigor, não sofreram um impacto relevante em função do revestimento em leito de jorro. Neste trabalho foi feito um estudo sobre o impacto do processo de revestimento de sementes de soja nas Máquinas Bandeirantes e Syngenta, no entanto verificou-se que estas também não tiveram um impacto relevante na qualidade final das sementes revestida, estando os valores em níveis semelhantes aos encontrados em revestimento promovido em leito de jorro, ou seja acima de 90%. Com base nisto, os índices de qualidade não podem ser usados como base para a escolha do leito de jorro como uma alternativa para o revestimento de sementes de soja.

No entanto, como descrito anteriormente o revestimento realizado nas máquinas Bandeirantes e Syngenta não apresentam uma etapa de secagem, ao contrário do leito de jorro que promove a secagem ao mesmo tempo em que reveste. Em função da boa agitação, mistura

e altas taxas de transferência de calor e massa o leito de jorro promove a formação de camadas de revestimento concêntricas com característica adesiva bastante forte. Amostras de sementes revestidas em leito de jorro revelam que as sementes mantêm o revestimento por mais de 3 anos sem perder as suas principais características.

Por outro lado, a camada de revestimento obtida tanto pela máquina Bandeirantes quanto Syngenta perdem completamente sua característica adesiva em poucos minutos. Conseqüentemente, sementes revestidas nestas duas máquinas não podem ser estocadas.

A grande vantagem dessas máquinas sobre o leito de jorro refere-se à capacidade de processamento. Devido aos clássicos limites de aumento de escala do leito de jorro, este equipamento ainda não suporta a alta demanda de inoculação requerida pelos grandes produtores agrícolas. Entretanto, para o pequeno produtor o leito de jorro pode ser uma alternativa interessante, devido às vantagens observadas neste estudo, ou seja, a maior homogeneidade e a possibilidade de estocagem.

4.2.6 – Aplicação do Modelo de Balanço Populacional para o Leito de Jorro

O estudo da cinética de crescimento da camada de revestimento das sementes de soja recobertas em leito de jorro foi realizado nas condições descritas na Tabela 4.12. Os experimentos foram realizados variando a vazão de alimentação de ar de jorro (V_{AJ}) e a temperatura do ar de jorro (T_{AJ}) na entrada do leito em °C.

Tabela 4.12 – Matriz do planejamento de um **pcc** para duas variáveis.

Experimento	V_{AJ} (m ³ /s)	T_{AJ} (°C)
1	0,056	36
2	0,056	42
3	0,062	36
4	0,062	42
5	0,059	39
6	0,055	39
7	0,063	39
8	0,059	34,7
9	0,059	43,2
10	0,059	39

Na seqüência são apresentados resultados simulados e dados experimentais, na forma de curvas da função distribuição densidade $f(m)$ em função do tamanho da semente de soja para

os ensaios da Tabela 4.12. Observa-se nas Figuras 4.13 a 4.22, uma boa concordância entre os valores simulados pelo modelo de balanço populacional e os dados experimentais.

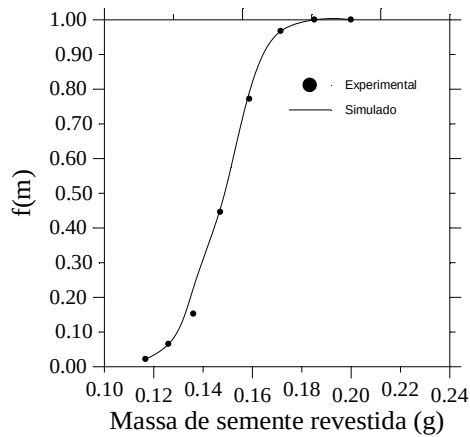


Figura 4.13 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 1)

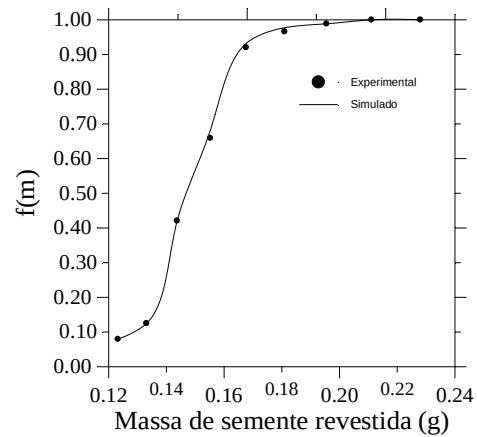


Figura 4.14 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 2)

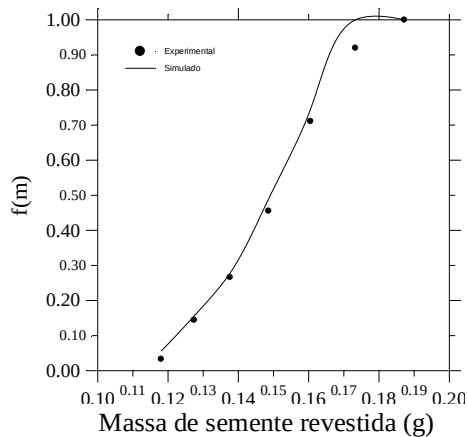


Figura 4.15 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 3)

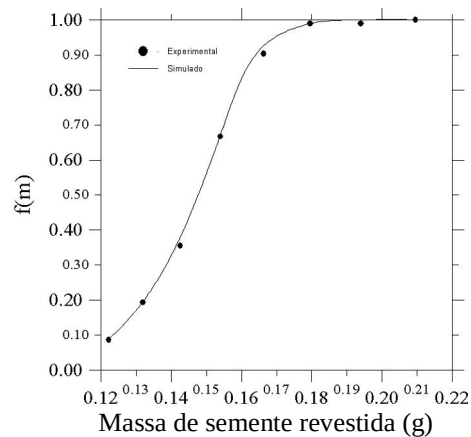


Figura 4.16 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 4)

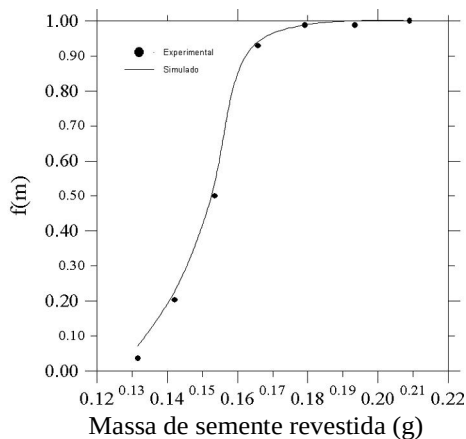


Figura 4.17 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 5)

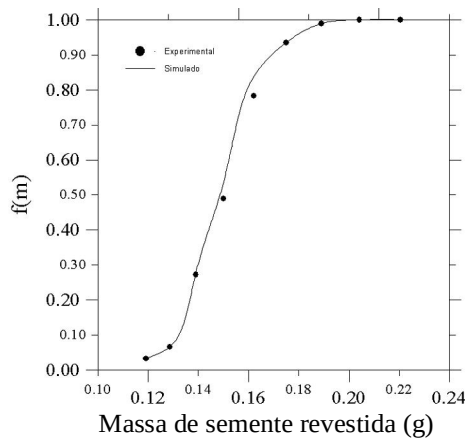


Figura 4.18 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 6)

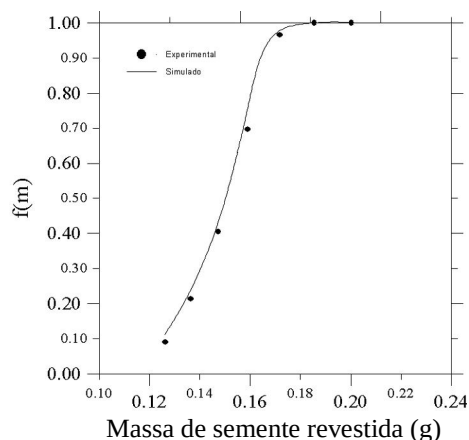


Figura 4.19 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 7)

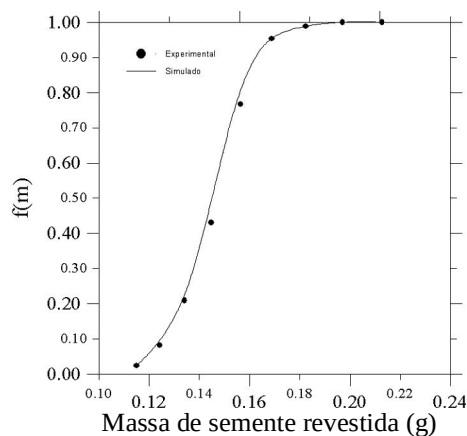


Figura 4.20 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 8)

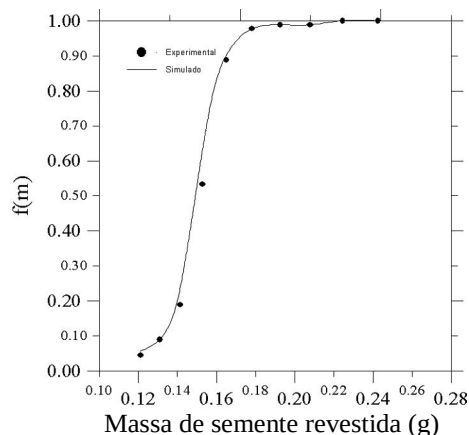


Figura 4.21 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 9)

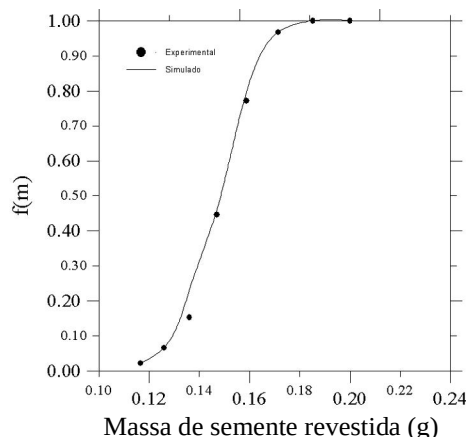


Figura 4.22 – Curva simulada e dados experimentais (Experimento 10)

O desvio médio entre os valores simulados e experimentais para a massa de recobrimento foi de 16,1%, sendo que o intervalo de confiança de 95% foi igual a 14,5%-17,8%. O desvio médio encontrado entre os valores experimentais e simulados da massa de semente recoberta para todos os experimentos foi de 0,28% com um intervalo de confiança de 95% igual a 0,22%–0,34%.

A diferença entre os níveis desses erros médios (0,28% e 16,1%), deve-se a diferença de ordem de grandeza entre a massa de revestimento e a massa de semente revestida.. Esses resultados evidenciam que é possível obter uma boa previsão da cinética de recobrimento em leite de jorro, a partir da metodologia utilizada neste trabalho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a aplicação da técnica de fluidodinâmica computacional foi possível simular o comportamento fluidodinâmico característico de um leito de jorro. Com base nas informações fluidodinâmicas simuladas foi possível identificar uma configuração de leito indicada para o revestimento de sementes de soja. A seguir são apresentadas as conclusões sobre os estudos de fluidodinâmica do leito de jorro e do revestimento de semente de soja.

5.1 ESTUDO DE FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO

A primeira constatação importante obtida neste estudo foi de que a malha computacional deve ser não estruturada na parte cônica do leito e estruturada na parte cilíndrica. O tamanho das células deve ter um valor médio da ordem de 5 a 10% acima do diâmetro da partícula. O incremento de tempo usado na simulação não pode ser inferior a 1.10^{-3} s ou a solução do problema irá divergir.

O modelo Euleriano Granular Multifásico descrito no Capítulo 3 foi capaz de reproduzir os perfis fluidodinâmicos de velocidade de partículas e distribuição de porosidade nas diferentes regiões do leito de jorro obtidos experimentalmente por HE et. al. (1994).

Assim, foi possível dar seqüência ao estudo da fluidodinâmica do leito de jorro adotando a metodologia de resolução numérica proposta.

Através da técnica de análise de imagem foi possível obter perfis de velocidade de partículas em leito de jorro “bidimensional” e estes tiveram uma boa concordância qualitativa e quantitativa quando comparados com os valores simulados por fluidodinâmica computacional.

No estudo do leito de jorro com tubo draft foi possível identificar perfis de queda de pressão, altura de fonte e taxa de recirculação, sendo estas informações fundamentais para o projeto deste equipamento. Cabe ressaltar, que para o leito de jorro com tubo draft, a relação $D_c/D_i = 6$ e a distância do tubo à base (h_d) de 0,04m mostraram-se as condições mais adequadas para a obtenção de uma maior taxa de recirculação. Estas condições foram

utilizadas no segundo estágio desta tese, ou seja, no estudo de revestimento de sementes de soja.

As simulações das curvas características para diferentes configurações de geometria, altura de leito e tipo de partículas tanto para leito cônico quanto para leito coni-cilindrico mostraram uma boa concordância com valores experimentais. Esta boa concordância se deu principalmente para a situação de volta, ou seja, para o decréscimo da vazão de ar de jorro, onde os parâmetros do leito de jorro são determinados.

Os resultados de simulação das curvas características, bem como da distribuição de fração de volume de sólidos, mostraram que é possível identificar a vazão de jorro mínimo e sua queda de pressão correspondente. Estes valores simulados na condição de jorro mínimo tanto para leito cônico quanto para leito coni-cilindrico mostraram uma boa concordância com os dados experimentais.

A análise da curva de desvio padrão normalizado da queda de pressão em função da vazão de ar de jorro permitiu a identificação da condição de jorro mínimo, este comportamento foi comprovado experimentalmente por LOURENÇO (2006).

Uma análise da curva de pressão total em função da vazão de ar de jorro mostrou que é possível identificar a condição de jorro mínimo e que os valores obtidos por esta metodologia tiveram uma boa concordância com os valores experimentais.

Os diferentes formatos da região de jorro descritos por MATHUR e EPSTEIN (1974), puderam ser previstos pelo modelo multifásico adotado. O diâmetro médio de jorro também pôde ser obtido por simulação e os resultados mostraram uma boa concordância com os valores obtidos pela correlação de McNAB (1972).

A simulação de perfil de velocidade de partículas na região longitudinal central do leito mostrou que o modelo matemático adotado prevê a existência de 3 regiões de aceleração conforme descrito por MATHUR e EPSTEIN (1974).

5.2 ESTUDO DE REVESTIMENTO DE SOJA EM LEITO DE JORRO

O estudo de revestimento de sementes de soja nas máquinas de tratamento Bandeirantes e Syngenta mostrou através dos índices de germinação, sementes não fissuradas e vigor, que o processo de recobrimento não ocasionou dano relevante na qualidade final das sementes revestida, estando os valores em níveis semelhantes aos encontrados por LUCAS (2000) em revestimento promovido em leito de jorro, ou seja acima de 90%.

Através do índice de dispersão foi possível mensurar o nível de heterogeneidade do revestimento promovido em leito de jorro e nas máquinas Bandeirantes e Syngenta. O leito de jorro apresentou um índice de dispersão médio de $1,03 \times 10^{-4}$ enquanto que as máquinas Bandeirantes e Syngenta tiveram valores médios de $3,02 \times 10^{-4}$ e $2,05 \times 10^{-4}$, respectivamente. Assim, o leito de jorro pode ser considerado como a melhor opção de equipamento para revestimento homogêneo em relação aos aqui estudados.

Neste estudo constatou-se que a qualidade do revestimento promovido em leito de jorro é superior ao obtido pelas máquinas de tratamento. No caso do revestimento obtido em leito de jorro as partículas podem ser estocadas por longo período, sem prejuízo a qualidade do revestimento. No entanto, o revestimento obtido pelas máquinas de tratamento Bandeirantes e Syngenta não podem ser estocados, pois perdem completamente suas características em poucos minutos.

O modelo de balanço populacional proposto neste trabalho mostrou-se capaz de prever a distribuição de tamanho de partícula recobertas após um determinado tempo de revestimento sob condições pré-estabelecidas de vazões de ar de jorro, ar de atomização, de suspensão e eficiência de revestimento. Através deste modelo foi possível prever as massas individuais de partícula revestida e de revestimento com um erro médio de 0,28% e 16,1%, respectivamente.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- No estudo de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro, avaliar outros modelos de troca de momento entre as fases, lembrando que neste trabalho foi adotado o modelo de GIDASPOW (1992);
- Comparar a fluidodinâmica do leito de jorro com e sem draft para condições equivalentes de vazão;
- Explorar mais as informações de flutuação de pressão simuladas pelo modelo Euleriano Granular Multifásico, no sentido de avaliar a distribuição de frequência e a Skewness (desvio da normalidade) como tentativa de identificar os diferentes regimes fluidodinâmicos do leito;

- Avaliar o efeito do coeficiente de elasticidade (e_{ss}) no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro. Cabe ressaltar, que neste estudo foi adotado o valor de 0,9 sendo este largamente indicado pela literatura, mas este poderá ser modificado com valores entre 0 e 1;
- Realizar um estudo experimental e de simulação de mistura de partículas em leito de jorro. Avaliar o efeito da mistura no comportamento fluidodinâmico e estabilidade do leito;
- Estudar a cinética de secagem de sementes de soja em leito de jorro através da técnica de fluidodinâmica computacional. Obter as curvas de taxa de secagem e os perfis de temperatura no interior do equipamento;
- Simular o processo de revestimento de partículas em leito de jorro adotando a técnica de fluidodinâmica computacional e avaliar os efeitos do processo na fluidodinâmica do leito;
- Realizar um estudo experimental comparativo entre a eficiência de revestimento de sementes de soja nas máquinas Bandeirantes, Syngenta e o leito de jorro;
- Realizar um estudo sobre o tempo de estocagem de sementes de soja inoculadas em leito de jorro, para que estas mantenham as propriedades do revestimento adequadas ao plantio (efeito latente). Neste caso, principalmente a atividade da bactéria;
- Realizar um teste de plantio com sementes revestidas em leito de jorro e nas máquinas Bandeirantes e Syngenta de forma a comparar a qualidade da planta;
- Realizar um estudo experimental de revestimento em leito de jorro operando de forma contínua, avaliar a capacidade de processamento e a qualidade do revestimento;
- Adotar a técnica de fluidodinâmica computacional, para simular um leito de jorro operando de forma contínua, com alimentação de partículas na base do leito e retirada na parte superior próxima a região da fonte.

ANEXO 1

Descrição do Método de Volumes Finitos

ANEXO 1

Descrição do Método de Volumes Finitos

A1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Esse anexo corresponde a uma descrição do método de volumes finitos que se baseou no trabalho de Barreira 2003, que apresenta maiores detalhes do desenvolvimento. Portanto, o equacionamento e desenvolvimento apresentados nesse anexo seguem a metodologia aplicada por Barreira 2003.

A solução numérica dos problemas de transferência de quantidade de momentum, energia e massa só são possíveis caso exista uma descrição matemática adequada dos processos de transporte. Esta descrição é normalmente feita de equações diferenciais. Não são de interesse a obtenção de equações diferenciais particulares, e sim a identificação da forma geral destas equações afim de que se possam estabelecer regras, também gerais, para sua solução.

Considere a Figura A1.1 a seguir, onde:

O fluxo $\vec{J}$ representa o escoamento da grandeza por unidade de tempo/unidade de área.

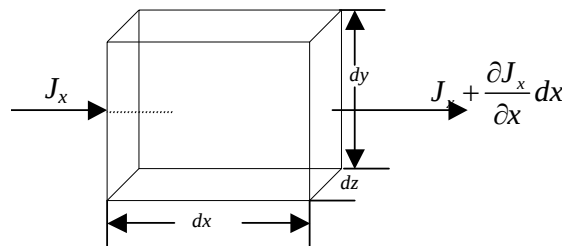


Figura A1.1- Balanço de fluxos em um Volume de Controle

O termos da equação diferencial de transporte (Equações governantes) são definidos por unidade de volume e por unidade de tempo.

- ϕ - propriedade específica (grandeza/unidade de massa);
- $\rho\phi$ - grandeza por unidade de volume;
- $\frac{\partial}{\partial t} \rho\phi$ - taxa de variação da grandeza por unidade de volume;
- J_x é o componente de $\vec{J}$ na direção x;
- $\vec{J}$ pode ser devido a convecção e condução.

No volume representado na Figura A1.1 tem-se:

- Taxa de variação da grandeza por unidade de volume: $\frac{\partial}{\partial t} \rho\phi$

- Efluxo líquido através da área $dydz = \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy dz$;
- Efluxo líquido por unidade de volume: $\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = \text{div} \vec{J} \equiv (\nabla \cdot \vec{J})$;

Taxa de geração/destruição por unidade de volume: S_ϕ ;

Conforme o princípio da conservação podemos escrever:

$$\text{Acúmulo} + \text{Efluxo líquido} = \text{Geração/destruição} \quad (\text{A1.1})$$

ou ainda:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div} \vec{J} = S_\phi \quad (\text{A1.2})$$

Desta forma pode-se então escrever o fluxo total como sendo:

$$\vec{J} = \underbrace{(\rho \vec{u})}_{\text{convecção}} \phi + \underbrace{[-\Gamma \text{grad} \phi]}_{\text{difusão}} \quad (\text{A1.3})$$

Substituindo a Equação (A1.3) na Equação (A1.2) obtém-se:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{acúmulo}} + \underbrace{\text{div}(\rho \vec{u}) \phi}_{\text{convecção}} = \underbrace{\text{div}([- \Gamma \text{grad} \phi])}_{\text{difusão}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{geração;destruição}} \quad (\text{2.14})$$

O Método dos Volumes Finitos é uma técnica numérica capaz de resolver equações diferenciais parciais, oriundas do balanço infinitesimal de uma propriedade ϕ (por exemplo: massa, quantidade de movimento, energia, etc), representando, portanto, o Princípio Físico da Conservação da referida propriedade (BARREIRA, 2003).

Equação Geral de Transporte (Conservação da Propriedade ϕ):

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (\text{A1.5})$$

A forma conservativa da equação supracitada é obtida diretamente através da aplicação do Princípio da Conservação na variável dependente de interesse, num volume infinitesimal (volume finito), sendo a mesma utilizada na derivação do Método dos Volumes Finitos (BARREIRA, 2003).

- Como as demais técnicas numéricas empregadas na resolução de *EDP's* , o Método dos Volumes Finitos transfere informações das fronteiras (condições de contorno), que

são especificadas para o interior do domínio de solução, obtendo a distribuição espacial e temporal ($\phi = \phi(x,y,z,t)$) da variável dependente em pontos discretos. Numa visão simplificada o mesmo consiste de 4 etapas (conforme descrito por BARREIRA, 2003):

- Divisão do domínio de solução em volumes de controle finitos;
 - Integração da equação diferencial parcial nos volumes de controle finitos, nos quais foi dividido o domínio de solução;
 - Discretização de cada termo da *EDP* de modo a convertê-la num conjunto de equações algébricas;
 - Solução do sistema de equações algébricas resultante, empregando métodos iterativos.
- Visando um melhor entendimento do Método e da linguagem associada ao mesmo, far-se-á uma introdução empregando o Sistema de Coordenadas Cartesianas e a abordagem em 2D, tendo em vista a facilidade da obtenção por analogia da abordagem em 3D.

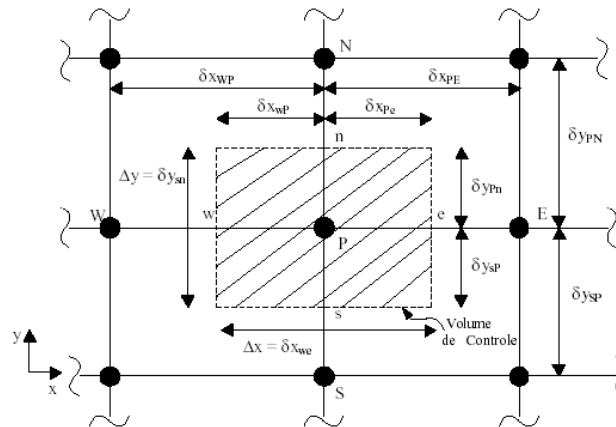


Figura A1.2 – Representação de um Volume de Controle Finito genérico em 2D.

(Fonte: BARREIRA, 2003 – (Patankar 1980))

Onde:

δ_{xWP} : distância entre o ponto nodal W e o ponto nodal P;

δ_{xPE} : distância entre o ponto nodal P e o ponto nodal E;

δ_{xwP} : distância entre a interface “w” e o ponto nodal P;

δ_{xPe} : distância entre o ponto nodal P a interface “e”;

δ_{ySP} : distância entre o ponto nodal S e pontos nodal P;

δ_{yPN} : distância entre o ponto nodal P e o ponto nodal N;

δ_{ysP} : distância entre a interface “s” o ponto nodal P;

δ_{yPn} : distância entre o ponto nodal P e a interface “n”.

$\Delta x = \delta x_{we}$: largura do volume de controle finito;

$\Delta y = \delta y_{sn}$: altura do volume de controle finito.

Quando $\delta x_{WP} = \delta x_{PE}$ e $\delta y_{SP} = \delta y_{PN}$ a malha é dita uniforme. O emprego de malhas uniforme é freqüentemente desejável e recomendável. Tendo em vista que a precisão da solução aumenta com o refinamento da malha, supondo que a convergência seja obtida, implicando num aumento do esforço computacional até alcançar o limite da capacidade de processamento; o emprego de malhas não-uniformes é capaz de utilizar efetivamente a capacidade de processamento disponível. As melhores malhas devem ser mais refinadas nas regiões onde há grandes variações da variável dependente (ϕ) e das propriedades físicas (ρ , μ , C_p e etc), e “grosseiras” nas regiões que apresentam variações relativamente pequenas. Muitos programas refinam automaticamente a malha nas áreas onde ocorrem variações acentuadas nas variáveis de interesse (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995, apud BARREIRA, 2003).

Desde que a distribuição $\phi(x,y,z)$ não é conhecida no domínio de cálculo, espera-se que o engenheiro tenha conhecimento acerca do sistema a ser modelado de modo a prever qualitativamente um comportamento da variável dependente, o qual pode ser empregado no refinamento da malha. Sugere-se que primeiramente obtenha-se soluções empregando malhas “grosseiras” (pouco refinadas) de modo a obter uma avaliação inicial sobre as variações de ϕ ; a partir da qual, a malha não-uniforme possa ser construída. Isto é uma das razões porque os autores insistem que o método numérico deva fornecer soluções dotadas de realismo físico até mesmo nos casos empregando malhas grosseiras. As análises das soluções obtidas a partir de malhas grosseiras não são úteis se o método só fornece soluções que apresentam realismo físico para malhas suficientemente refinadas (PATANKAR, 1980, apud BARREIRA, 2003).

O número de pontos da malha numérica necessária para fornecer uma solução acurada e a maneira que os mesmos se distribuem no domínio de cálculo são questões que dependem da natureza do problema a ser resolvido. Estudos usando uma malha com poucos pontos nodais consistem num modo conveniente de se compreender a natureza da solução. Tal procedimento é comumente empregado nos experimentos em laboratório, pois experimentos preliminares são conduzidos e as informações resultantes são usadas para decidir o número e a localização dos pontos de medição a serem instalados no experimento final (PATANKAR, 1980, apud BARREIRA, 2003).

A1.2 – As Quatro Regras Básicas de PATANKAR (1980) para Garantir o Realismo Físico da Solução Numérica

- **Regra 1:** para uma face comum a volumes adjacentes, o fluxo através desta face deve ser representado pela mesma expressão nas equações de discretização dos dois volumes de controle. Para a representação do fluxo na interface, deve-se usar o valor das propriedades também na interface, e não aquelas referentes aos centros dos volumes (posicionados a direita ou esquerda da interface). Cabe ressaltar a idéia de que o fluxo não pertence ao volumes e sim à face comum a volumes adjacentes. Caso isto não seja considerado o balanço global da grandeza considerada não será satisfeito;
- **Regra 2:** A influência dos pontos vizinhos vem dos mecanismos de convecção e difusão. Caso o valor da grandeza estudada aumente em um ponto vizinho de P por exemplo, considerando as demais propriedades constantes, esta grandeza também aumentará no ponto P. Logo, para que haja realismo físico na solução, um aumento no valor de um ponto nodal da malha, considerando que nenhum dos pontos nodais interiores a malha seja especificado, implicaria num aumento nos valores dos pontos nodais vizinhos. Por convenção assegura-se que todos os coeficientes tenham o sinal positivo. Na verdade pode-se ter todos os coeficientes positivos ou todos negativos, entretanto, adota-se sempre $a_p > 0$ e $a_{vz} > 0$ (vz=vizinho) por conveniência.
- **Regra 3:** Quando o termo fonte for linearizado ele deve-ser sempre menor que zero. Como visto, a equação discretizada com o termo fonte linearizado fica: $a_p = (a_w + a_e + a_s + a_n - S_p \Delta V)$. Mesmo que a soma dos coeficientes $a_w + a_e + a_s + a_n$ seja positiva, o coeficiente principal a_p pode se tornar negativo se $S_p > \frac{a_w + a_e + a_s + a_n}{\Delta V}$. Portanto, $S_p \leq 0$ para assegurar que $a_p > 0$. Na verdade, a maioria dos processos físicos estáveis é modelada com $S_p \leq 0$. Ou seja, um aumento da grandeza estudada corresponde a um S_p negativo e conseqüentemente redução desta propriedade (Ex: Temperatura). Logo se ϕ_p aumenta com $S_p \leq 0$ então ϕ_p diminui (efeito estabilizador) caso

contrário se ϕ_p aumenta $S_p > 0$ então ϕ_p aumenta provocando um feito desestabilizador.

- **Regra 4:** Soma dos coeficientes dos pontos nodais vizinhos. Quando a equação diferencial é constituída apenas de derivadas da variável dependente e não há termo de geração, a solução será uma família de curvas e a diferença entre ϕ e $(\phi + c)$ será apenas o valor da constante. Embora ambas as soluções satisfaçam a equação diferencial, tal propriedade deve ser refletida pela forma discretizada da equação diferencial que apresenta tal peculiaridade, para isto a_p deve ser igual à soma dos coeficientes vizinhos (BARREIRA, 2003). Daí , conforme (BARREIRA, 2003):

$$a_p \phi_p = \sum a_{viz} \phi_{viz} \text{ e } a_p (\phi_p + c) = \sum a_{viz} (\phi_{viz} + c) \therefore c = \text{constante} \quad (\text{A1.28})$$

$$\text{Logo:} \quad a_p = \sum a_{viz} \quad (\text{A1.29})$$

Equação (A1.26) discretizada, quando aplicada ao conjunto de volumes finitos que compõem uma malha, constitui um sistema de equações algébricas lineares, as quais são resolvidas empregando métodos numéricos adequados. Contudo, em muitas situações a não linearidade está presente e nestas situações deve-se seguir o seguinte procedimento:

- Iniciar com uma estimativa para os valores de ϕ em toda a malha;
- A partir da estimativa inicial, calcula-se os valores dos coeficientes presentes na equação diferencial discretizada;
- Com estes valores resolve-se o sistema de equações “lineares” (linearizadas) de modo a obter novos valores de ϕ ;
- Com os valores de ϕ obtidos na etapa anterior retorna-se a etapa 2 e repete-se este processo até que o critério de convergência adotado seja satisfeito.

ANEXO 2

Modelagem de Fluxos Multifásicos via FLUENT

A2 - MODELAGEM DE FLUXOS MULTIFÁSICOS VIA FLUENT

A2.1 – Modelagem de Fluxos Multifásicos via FLUENT

A2.1.1 – Fluxos Multifásicos

As fases físicas da matéria são gás, líquido e sólido; mas o conceito de fase em um sistema de fluxo multifásico é aplicado em um sentido mais amplo. Partículas sólidas com tamanhos diferentes do mesmo material podem ser tratadas como fases diferentes porque cada conjunto de partículas com o mesmo tamanho terá uma resposta dinâmica similar para o mesmo fluxo.

A2.1.2 – Regimes de Fluxo Multifásico

O fluxo multifásico pode ser classificado pelos seguintes regimes:

- **Fluxos gás-líquido ou líquido-líquido**
 - ❖ *Bubbly flow*: bolhas discretas de gás ou fluido em fluido contínuo.
 - ❖ *Droplet flow*: gotas discretas de fluido em um gás contínuo.
 - ❖ *Slug flow*: bolhas grandes em um fluido contínuo.
 - ❖ *Stratified/free-surface flow*: fluidos imiscíveis separados por uma interface claramente definida.
- **Fluxos gás-sólido**
 - ❖ *Arraste de Partículas*: partículas sólidas discretas em um gás contínuo.
 - ❖ *Transporte pneumático*: o fluxo depende de fatores como carga de sólido, número de Reynolds e propriedades da partícula. Como exemplo podem-se destacar leitos empacotados e fluxo homogêneo.
 - ❖ *Leito de Jorro*: neste caso a fase fluida é o ar e a fase sólida são as partículas, caso deseje considerar uma distribuição de tamanho de partículas cada tamanho de partículas é considerado uma nova fase.
- **Fluxos líquido-sólido**
 - ❖ *Slurry flow*: transporte de partículas em líquidos. No *slurry flow*, o número de Stokes é normalmente menor que 1. Quando o número de Stokes é maior que 1, a vazão é caracterizada como fluidização líquido-sólido.

- ❖ *Transporte Hidráulico*: partículas sólidas denso-distribuídas em um líquido contínuo.
- ❖ *Sedimentação*: uma coluna alta inicialmente contendo uma mistura dispersa uniforme de partículas. Na base, as partículas descerão e formarão um leito de lama. No topo uma interface limpa será formada e no meio existirá uma zona constante estabelecida.
- ❖ *Vazão trifásica*: combinação das outras listadas acima.

Podem ser citados, dentre outros, alguns exemplos específicos para cada regime:

- *Bubbly flow*: absorvedores, aeração, bombas de elevação de ar, cavitação, evaporadores, flutadores;
- *Droplet flow*: movimento de bolhas grandes em tubos ou tanques;
- *Stratified/free-surface flow*: ebulição e condensação em reatores nucleares, agitação de líquido em dispositivos do separador;
- Arraste de partículas: ciclones, classificadores de ar, coletores de poeira;
- Transporte pneumático: transporte de sementes, grãos e metais em pó;
- *Slurry flow*: transporte de cimento, processamento mineral;
- Transporte Hidráulico: processamento mineral;
- Sedimentação: processamento mineral;

Cada um dos regimes supracitados está ilustrado na Figura 2.16.

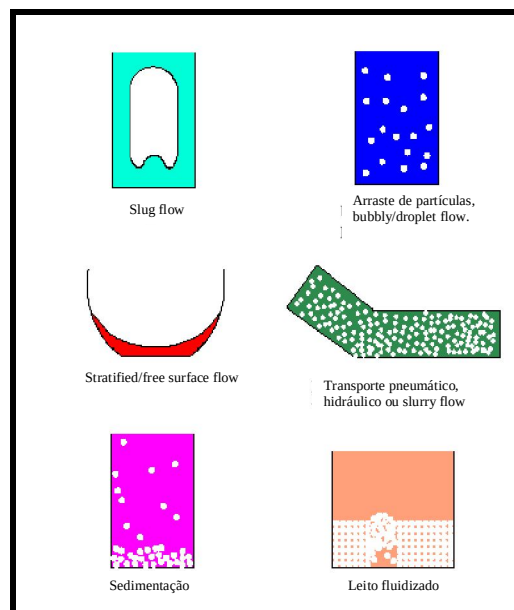


Figura A2.1 – Regimes de Fluxo Multifásico

ANEXO 3

Descrição Matemática do Problema Multifásico

A3 – DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA MULTIFÁSICO

A base para esse capítulo é o *documentation* do software fluent 6.3.21.

A3.1 – Método de Solução Sequencial

- Neste método as equações governantes são resolvidas sequencialmente (segregada uma da outra). Por causa das não linearidades das equações governantes várias iterações devem ser realizadas até se obter uma convergência. Cada iteração consiste de um incremento, ilustrado na Figura A3.1.

A cada situação:

- As propriedades dos fluidos são atualizadas;
- As equações de momentum são resolvidas usando valores atualizados para pressão e fluxos de massa na face;
- Desde que as velocidades obtidas em um incremento de tempo podem não satisfazer a equação da continuidade localmente, uma equação do “tipo-Poisson” para a correção da pressão é gerada a partir da equação da continuidade e das equações de momentum linearizadas. Esta equação de correção da pressão é então resolvida para obter as correções necessárias da pressão e do perfil de velocidade e o fluxo de massa na face assim que a continuidade é satisfeita.

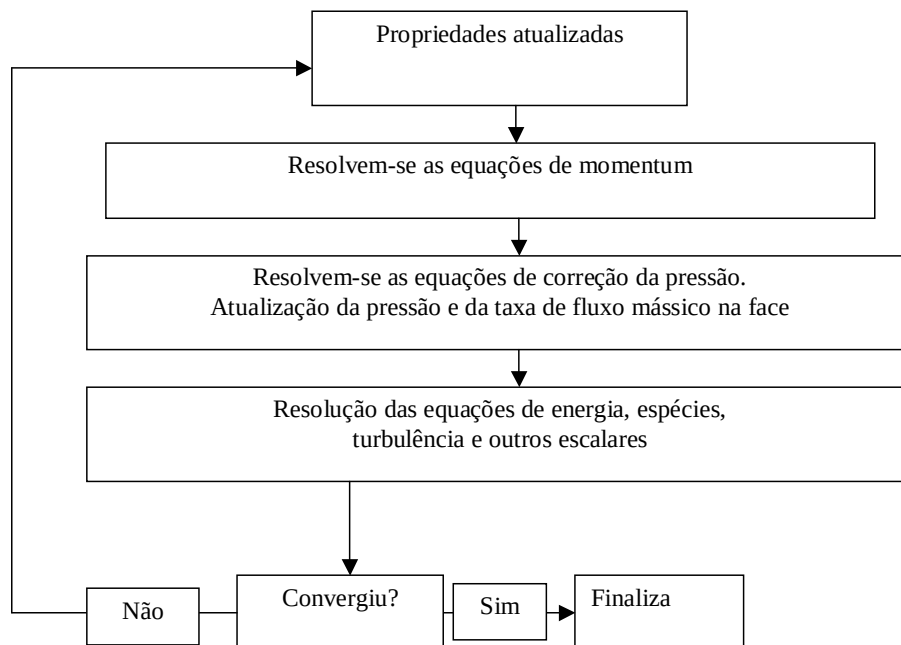


Figura A3.1 - Algoritmo do Método de Solução Segregada

Quando apropriado equações para escalares como turbulência, energia, espécies e radiação são resolvidas utilizando valores previamente atualizados de outras variáveis;

A3.2 – Método de Solução Simultânea

Este método resolve as equações governantes da continuidade, momentum, e quando apropriado as equações de energia e transporte de espécies simultaneamente. As equações governantes de escalares adicionais são resolvidas seqüencialmente usando o procedimento descrito para o resolvedor segregado. Por causa da não linearidade muitas vezes são necessárias várias iterações até atingir a convergência. Cada iteração consiste de etapas ilustradas na Figura A3.2 descritas abaixo:

- As propriedades do fluido são atualizadas, baseadas na solução corrente (partindo das condições iniciais);
- As equações da continuidade, momentum, energia e espécies são resolvidas simultaneamente;
- Quando apropriado, equações para escalares assim como turbulência e radiação são resolvidas usando valores atualizados de outras variáveis;
- Uma verificação da convergência das equações são feitas.

Estas etapas são executadas até o critério de convergência ser satisfeito.

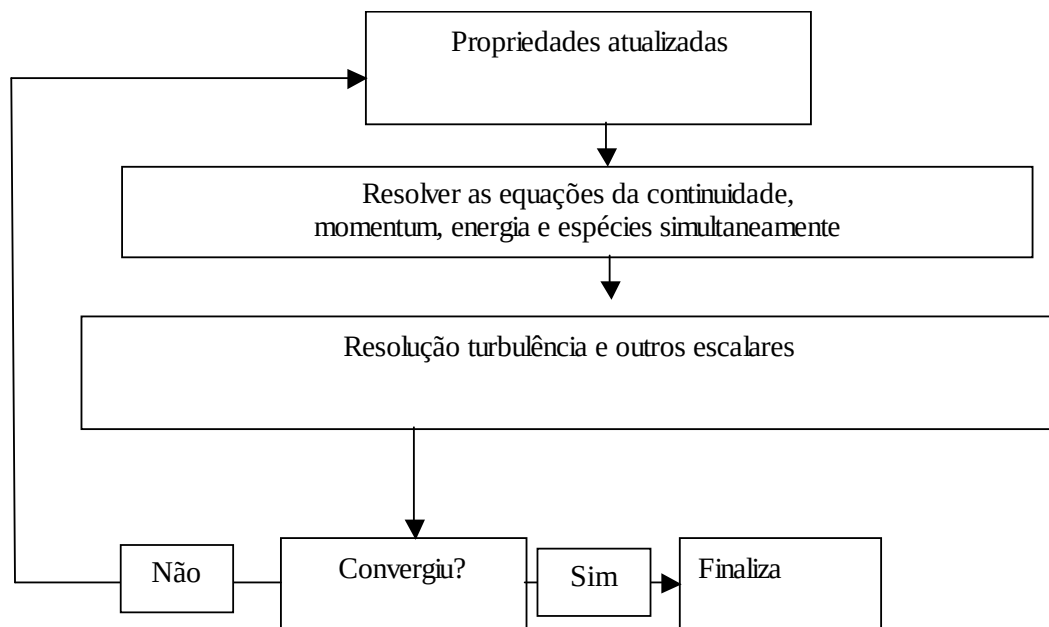


Figura A3.2 - Algoritmo do Método de Solução Segregada

A3.3 – Linearização: Implícita e Explícita

Em ambos os métodos de solução segregada e acoplada as equações governantes não lineares são linearizadas para se obter um sistema de equações a ser resolvido pra cada célula computacional. A maneira na qual as equações governantes são linearizadas pode ser implícita ou explícita com respeito a variável de interesse.

No método implícito, para uma dada variável, o valor não conhecido em cada célula é calculado usando uma relação que inclui os valores conhecidos e desconhecidos das células vizinhas. Então cada valor desconhecido aparecerá em mais que uma equação no sistema, e estas equações devem ser resolvidas simultaneamente para quantidades desconhecidas.

No método explícito para uma dada variável o valor não conhecido em cada célula é calculado usando uma relação que inclui somente valores conhecidos. Então cada valor desconhecido irá aparecer em somente uma equação no sistema e as equações para os valores desconhecidos em cada célula podem ser obtidas no tempo.

No método de solução segregado cada equação governante discreta é linearizada implicitamente com respeito às variáveis dependentes das equações. Isto resultará em um sistema de equações lineares com uma equação para cada célula no domínio. No ponto implícito um resolvidor de equações lineares (Gauss-Seidel) é usado em conjunto com um método algébrico multimalha (AMG) para resolver o sistema de equações escalares para a variável dependente em cada célula. Por exemplo, a equação de momentum-x é linearizada para produzir um sistema de equações no qual a velocidade $\vec{u}$ é desconhecida. A solução simultânea do sistema de equações (usando o resolvidor AMG) gera um campo de velocidade $\vec{u}$ atualizado.

Em resumo, o resolvidor segregado resolve para um campo de uma variável simples considerando todas as células ao mesmo tempo. Na seqüência ele resolve para o próximo campo da variável considerando novamente todas as células ao mesmo tempo, e assim por diante. Não existe a opção explícita para o resolvidor segregado.

No método de solução acoplada é necessário escolher entre usar uma linearização explícita ou implícita das equações governantes. Esta escolha aplica-se somente para as equações governantes. Outras equações que não governantes são resolvidas pelo método segregado.

Caso seja escolhida a opção de resolvidor acoplado, cada equação governante acoplada é linearizada implicitamente com respeito a todas as variáveis dependentes. Isto resultará em

um sistema de N equações lineares para cada célula no domínio, onde N é o número de equações acopladas. Como existem N equações por célula, este é às vezes chamado de um sistema de equações “em bloco”. Um resolvidor de equação linear com ponto implícito (bloco Gauss-Seidel) é usado em conjunto com um método algébrico multimalha (AMG) para resolver o “bloco” de equações resultante para todas as N variáveis dependentes em cada célula. Por exemplo, a linearização das equações da continuidade momento e energia produzirá um sistema de equações na qual a pressão (p) e os vetores velocidade ($\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$) e a temperatura (T) são desconhecidas.

Em resumo, a opção de resolução implícita acoplada obtém a solução para todas as variáveis ($p, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w}, t$) em todas as células ao mesmo tempo.

Caso se opte pelo resolvidor acoplado e o método explícito, cada equação é acoplada e as equações governantes são linearizadas explicitamente. Como na opção implícita, isto também resulta em um sistema com N equações para cada célula do domínio. Contudo, este sistema de equações é explícito nas variáveis dependentes não conhecidas. Neste caso o resolvidor de equações lineares não é necessário. A solução é atualizada usando um resolvidor multi-estágio (Runge-Kutta). Aqui se tem a opção adicional de empregar um esquema multimalha (FAS, “full approximation storage”) para acelerar o resolvidor multi-estágio.

Em resumo, a opção de resolução acoplada explícita obtém a solução para todas as variáveis ($p, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$ e t) em uma célula no tempo. Observe que o esquema “FAS” multimalha é um componente opcional do método explícito, enquanto o “AMG” é um elemento requerido em ambos métodos segregados e acoplados implícito.

A3.4 – Discretização

O FLUENT[®] usa uma técnica baseada em volumes de controle para converter as equações governantes em equações algébricas que podem ser resolvidas numericamente. Esta técnica de volumes de controle consiste de integrar as equações governantes sobre cada volume de controle, gerando equações discretas que conservam cada quantidade em um volume de controle (como descrito no tópico Volumes Finitos).

A discretização das equações governantes pode ser ilustrada mais facilmente considerando uma equação de conservação em estado estacionário para o transporte da quantidade escalar ϕ . Isto é demonstrado pela Equação (A3.1) escrita na forma integral para um volume de controle arbitrário V .

$$\oint \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla_\phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (\text{A3.1})$$

onde: ρ = densidade;

$\vec{v}$ = vetor velocidade ($= u\hat{i} + v\hat{j}$ em 2D);

$\vec{A}$ = vetor área de superfície;

Γ_ϕ = coeficiente de difusão para ϕ ;

∇_ϕ = gradiente de ϕ ($= (\partial\phi/\partial x)\hat{i} + (\partial\phi/\partial y)\hat{j}$) em 2D;

S_ϕ = superfície de ϕ por unidade de volume

A Equação (A3.1) é aplicada a cada volume de controle, ou célula, no domínio computacional. A célula bidimensional triangular apresentada na Figura A3.3 é um exemplo de um volume de controle. A discretização da Equação (A3.1) em um dado volume de controle é dada por:

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi (\nabla_\phi)_n \vec{A}_f + S_\phi V \quad (\text{A3.2})$$

onde: N_{faces} = número de faces que compõe a célula;

ϕ_f = valor de ϕ que atravessa a face f ;

$\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$ = fluxo mássico através da face;

$\vec{A}_f$ = área da face f ,

$(\nabla_\phi)_n$ = magnitude de ∇_ϕ normal a face f ;

V = volume da célula.

A equação resolvida considera uma mesma forma geral como a fornecida acima e aplica a sistemas multidimensionais compostos por malhas não estruturadas e estruturadas.

No modo “default”, são armazenados os valores discretos de escalares ϕ no centro das células. O esquema de interpolação utilizado para obter os valores no centro de cada célula é o esquema “upwind”.

O método “upwind” considera que o valor de ϕ_f na face é obtido a partir das quantidades nas células anteriores, relativo a direção normal do vetor velocidade v_n na Equação (A3.2). Pode-se optar pela escolha de quatro esquemas sendo estes: upwind: primeira-ordem, segunda-ordem, power law e QUICK.

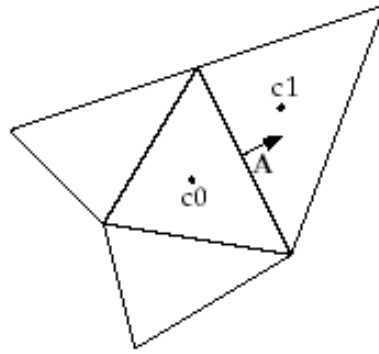


Figura A3.3 -Volume de controle usado para ilustrar a discretização da Equação de Transporte de um escalar.

A3.5 – Esquema Upwind de Primeira Ordem

Quando este esquema é utilizado, quantidades nas faces das células são determinadas assumindo que o valor no centro da célula de algum campo da variável representa um valor médio ao longo de toda a célula; considera ainda que as quantidades na face são idênticas à quantidade na célula. Assim quando a opção upwind de primeira ordem é selecionada, o valor da face ϕ_f é igual ao valor de ϕ na face jusante.

A3.6 – Esquema Power-Law

O esquema de discretização power-law interpola o valor da face de uma variável, ϕ , usando a solução exata. No caso de uma equação unidimensional de difusão convectiva pode-se escrever.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{A3.3})$$

onde Γ e ρu são constantes em um intervalo ∂x . A Equação (A3.3) pode ser integrada para gerar a seguinte solução descrevendo como ϕ varia com x :

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(Pe \frac{x}{L}\right) - 1}{\exp(Pe) - 1} \quad (\text{A3.4})$$

onde: $\phi_0 = \phi|_{x=0}$

$$\phi_L = \phi|_{x=L}$$

Pe é o numero de Peclet, dado por:

$$Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma} \quad (A3.5)$$

A variação de $\phi(x)$ entre $x=0$ e $x=L$ é descrita na Figura A3.4 para uma faixa de valores de número de Peclet sendo $1 < Pe < -1$.

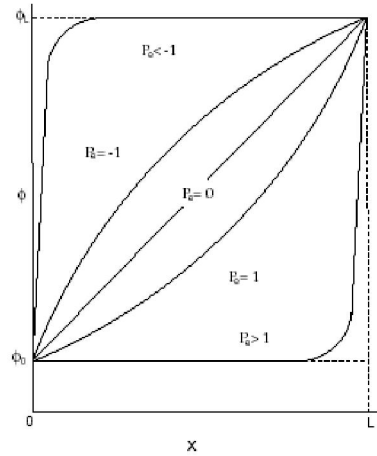


Figura A3.4 - Variação de uma Variável ϕ entre $x=0$ e $x=L$.

A Figura A3.4 mostra que para altos valores de Pe , o valor de ϕ em $x=L/2$ é aproximadamente igual ao valor “upstream” (célula a jusante). Isto implica que quando o fluxo é dominado pela convecção, a interpolação pode ser acompanhada simplesmente pela leitura do valor da variável da face “upwind” ou valor “upstream”. Este é o esquema padrão de primeira ordem.

A Figura A3.4 mostra que para valores altos de Pe , o valor de ϕ em $x=L/2$ é aproximadamente igual ao valor “upstream”. Observa-se também que ϕ pode ser interpolado usando uma média linear simples entre os valores de $x=0$ e $x=L$, quando o número de Peclet é nulo. Quando Pe possui um valor intermediário, o valor interpolado para ϕ em $x=L/2$ deve ser obtido aplicando o modelo “power-law”.

A3.7 – Esquema Upwind de Segunda Ordem

Quando a precisão de segunda ordem é desejada, as quantidades nas células são calculadas usando uma reconstrução linear multidimensional aproximada. Nesta aproximação, é atingida uma precisão de alta ordem nas faces das células através de uma expansão em série

de Taylor de soluções de células centradas sobre uma célula centróide. Assim, quando um “upwind” de segunda-ordem é selecionado, o valor de ϕ_f é calculado usando a seguinte expressão:

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \Delta \vec{s} \quad (\text{A3.6})$$

onde ϕ e $\nabla \phi$ são os valores centrado na célula e seu gradiente na célula “upstream”, e $\Delta \vec{s}$ é o vetor deslocamento a partir de uma célula centróide jusante para o centróide da face. Esta formulação requer a determinação do gradiente $\nabla \phi$ em cada célula. Este gradiente é calculado usando o teorema divergente, o qual na forma discreta é escrito como:

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{\text{faces}}} \bar{\phi}_f \bar{A} \quad (\text{A3.7})$$

Aqui o valor da face $\bar{\phi}_f$ é calculado pela media de ϕ a partir das duas células adjacentes à face.

A3.8 – O Esquema QUICK

Este método é indicado para malhas quadrilaterais e hexahédricas, onde uma única face jusante e montante pode ser identificada. O esquema Quick é baseado na média ponderada do “upwind” de segunda ordem e interpolação central da variável. Para a face e na Figura A3.5, se o fluxo é direcionado da esquerda para a direita pode-se escrever.

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P + \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (\text{A3.8})$$

Se $\theta=1$ a equação acima resulta em uma interpolação de segunda ordem central. Quando $\theta=0$ obtém-se método “upwind” de segunda ordem. O esquema QUICK tradicional é obtido fixando $\theta=1/8$. O esquema QUICK será mais preciso em malhas estruturadas alinhadas com a direção do fluxo. O esquema QUICK pode ser adotado no caso de malhas não estruturadas ou híbridas, nestes casos usa-se o esquema de discretização upwind de segunda ordem.

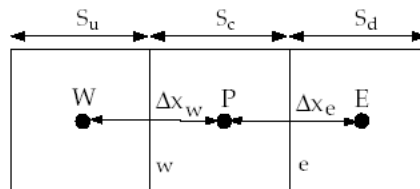


Figura A3.5 - Volume de controle Unidimensional

A3.9 – Esquema de Diferenciação Central

Um esquema de discretização com diferenciação central com precisão de segunda ordem é adotado para as equações de momentum quando se utiliza o modelo de turbulência. O esquema de diferenciação central (CD) calcula o valor da variável (ϕ_f) na face como mostrado a seguir:

$$\phi_{f,CD} = \frac{1}{2}(\phi_0 + \phi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\phi_{r,0}\vec{r}_0 + \nabla\phi_{r,1}\vec{r}_1) \quad (A3.9)$$

onde o índice 0 e 1 referem-se as células comuns a face f , $\nabla\phi_{r,0}$ e $\nabla\phi_{r,1}$ são os gradientes reconstruídos nas células 0 e 1, respectivamente, e $\vec{r}$ é o vetor direcionado a partir do centróide da célula em direção ao centróide da face.

Sabe-se que o esquema de diferenciação central pode produzir soluções ilimitadas e algumas sem significado físico, as quais podem gerar problemas de instabilidade numérica. Este problema de instabilidade numérica pode freqüentemente ser evitado se uma aproximação para o valor na face usada. Nesta aproximação, o valor da face é calculado segundo a Equação (A3.10):

$$\phi_f = \underbrace{\phi_{f,UP}}_{\text{parte implícita}} + \underbrace{(\phi_{f,CD} - \phi_{f,UP})}_{\text{parte explícita}} \quad (A3.10)$$

onde UP é padrão para o upwind. Como indicado, a parte “upwind” é tratada implicitamente enquanto a diferença entre o valor central e o valor “upwind” é tratado explicitamente. Desde que a solução numérica convirja, esta aproximação leva a uma diferenciação pura de segunda ordem.

A3.10 – Forma Linearizada da Equação Discreta

A equação de transporte de um escalar discretizada contém a variável escalar (ϕ) não conhecida no centro da célula bem como valores desconhecidos em torno de sua vizinhança. Esta equação em geral é não linear em relação a esta variável. Uma forma linearizada desta equação pode ser escrita:

$$a_p\phi = \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} + b \quad (A3.11)$$

onde o subscrito nb se refere as células vizinhas e a_p e a_{nb} são coeficientes linearizados para ϕ e ϕ_{nb} .

O número de células vizinhas para cada célula depende do tipo de malha, mas será tipicamente igual ao número de faces que fecham a célula. Equações similares podem ser escritas para cada célula que compõem a malha.

A3.11 – Sub-Relaxação

Por causa da não linearidade das equações que são resolvidas é necessário o controle de atualização do valor de ϕ_1 . Isto é tipicamente atingido por sub-relaxação, que reduz a atualização de ϕ_1 produzida durante cada iteração. Em uma forma simples, o novo valor da variável ϕ_1 dentro da célula depende do valor antigo (passo anterior), ϕ_{old} , a troca calculada em ϕ_1 , $\Delta\phi_1$, e o fator de sub-relaxação, α e é dada pela Equação (A3.12).

$$\phi_1 = \phi_{old} + \alpha\Delta\phi_1 \quad (A3.12)$$

A3.12 – Discretização Temporal

Para simulações transientes, as equações governantes devem ser discretizadas no tempo e no espaço. A discretização espacial para a equação dependente no tempo é idêntica ao caso de estado estacionário. A discretização temporal envolve a integração de todos os termos na equação diferencial em um tempo Δt . A integração do termo transiente segue o procedimento apresentado abaixo.

Uma expressão genérica para a evolução do tempo de uma variável ϕ_1 é dada por:

$$\frac{\partial\phi_1}{\partial t} = F(\phi_1^n) \quad (A3.13)$$

onde a função F incorpora uma discretização espacial. Caso o tempo derivativo seja discretizado usando diferenças “a ré”, a discretização temporal de primeira ordem será obtida por:

$$\frac{\phi_1^{n+1} - \phi_1^n}{\Delta t} = F(\phi_1^n) \quad (A3.14)$$

e a discretização de segunda ordem é dada por:

$$\frac{3\phi_1^{n+1} - 4\phi_1^n + \phi_1^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi_1) \quad (A3.15)$$

onde

- ϕ_1 = uma quantidade escalar;
- $n+1$ = valor no próximo nível de tempo, $t + \Delta t$;
- n = valor no nível de tempo corrente, t ;
- $n-1$ = valor no nível de tempo anterior, $t - \Delta t$.

A3.13 – Integração Implícita no Tempo

Um método para calcular $F(\phi)$ em um nível de tempo futuro é dado pela Equação (A3.16):

$$\frac{\phi_1^{n+1} - \phi_1^n}{\Delta t} = F(\phi_1^{n+1}) \quad (\text{A3.16})$$

Esta será uma integração implícita desde que ϕ_1^{n+1} em uma dada célula é relatada a ϕ_1^{n+1} em células vizinhas através de $F(\phi_1^{n+1})$:

$$\phi_1^{n+1} = \phi_1^n + \Delta t F(\phi_1^{n+1}) \quad (\text{A3.17})$$

Esta equação implícita pode ser resolvida iterativamente inicializando ϕ_1^i para ϕ_1^n e interagindo a equação.

$$\phi_1^i = \phi_1^n + \Delta t F(\phi_1^i) \quad (\text{A3.18})$$

para a formulação de primeira ordem implícita, ou

$$\phi_1^i = \frac{4}{3}\phi_1^n - \frac{1}{3}\phi_1^{n-1} + \frac{2}{3}\Delta t F(\phi_1^i) \quad (\text{A3.19})$$

para a formulação de segunda ordem implícita. A vantagem de um esquema totalmente implícito é que este é incondicionalmente estável com respeito ao tamanho do passo no tempo.

A3.14 – Integração Explícita no Tempo

Este método calcula $F(\phi)$ no nível de tempo corrente:

$$\frac{\phi_1^{n+1} - \phi_1^n}{\Delta t} = F(\phi_1^n) \quad (\text{A3.20})$$

e é referido como integração explícita desde que ϕ_1^{n+1} possa ser explicitado em termos de ϕ_1^n :

$$\phi_1^{n+1} = \phi_1^n + \Delta t F(\phi_1^n) \quad (\text{A3.21})$$

A3.15 – O Resolvedor Segregado

Esta prática é mais facilmente descrita considerando as equações de momentum e da continuidade em estado estacionário na forma integral:

$$\oint \rho \vec{v} d\vec{A} = 0 \quad (\text{A3.22})$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} d\vec{A} = - \oint p I d\vec{A} + \oint \bar{\bar{\tau}} d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (\text{A3.23})$$

onde I é matriz identidade, $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor tensão, e $\vec{F}$ é o vetor força.

A3.16 – Discretização da Equação da Continuidade

A Equação (A3.23) deve ser integrada sobre um volume de controle seguindo a equação discreta a seguir:

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (\text{A3.24})$$

onde J_f é o fluxo mássico através da face f , ρv_n .

Como descrito anteriormente as equações da continuidade e momentum são resolvidas sequencialmente. Neste procedimento sequencial, a equação da continuidade é usada como uma equação para pressão. Contudo, a pressão não aparece explicitamente na Equação (A3.24) para fluxos incompressíveis, desde que a densidade não esteja diretamente relacionada à pressão. O SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) é usado para introduzir a pressão na equação da continuidade. Este procedimento é descrito a seguir.

Faz-se necessário relacionar o valor da velocidade na face $\vec{v}_n$ com o valor armazenado no centro da célula. O fluxo em uma face, J_f , pode ser escrito da seguinte forma:

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (\text{A3.25})$$

onde p_{c0} e p_{c1} são a pressão dentro das duas células em ambos os lados da face, e $\hat{J}_f$ contem a influência das velocidades desta célula. O termo d_f é função de $\bar{a}_p$, a média dos coeficientes a_p da equação do momentum para as células em ambos os lados da face f .

A3.17 – Esquema de Interpolação da Densidade

Para o cálculo de fluxo compressível o FLUENT® aplica o esquema “upwind” de interpolação para a variável densidade nas células. Para fluxos incompressíveis três esquemas de interpolação podem ser usados: upwind de primeira ordem (“default”), “upwind” de segunda ordem e QUICK.

O esquema “upwind” de primeira ordem considera a densidade na face da célula como sendo o valor do centro da célula jusante. Este esquema gera estabilidade para a equação de correção da pressão e gera bons resultados para muitas classes de fluxos.

O esquema “upwind” de segunda ordem gera mais estabilidade para fluxos supersônicos e capta choques melhor que o esquema de primeira ordem; o esquema QUICK para a densidade é similar ao QUICK para outras variáveis.

Enquanto o esquema “upwind” de segunda ordem e o QUICK não podem ser usados para o caso de fluxos compressíveis multifásicos, o esquema “upwind” é usado para a fase compressível e uma média aritmética é usada para a fase incompressível.

A3.18 – Acoplamento Pressão –Velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento seqüenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo imperfeito de velocidade se aproxime progressivamente da solução que satisfaz a Equação da Continuidade na forma discretizada.

A acoplagem da Pressão com a Velocidade é feita usando a Equação (A3.25) para obter a pressão a partir da equação da continuidade discreta. O FLUENT[®] permite a escolha de três algoritmos de acoplagem pressão-velocidade, são eles: SIMPLE, SIMPLEC e PISO.

A3.19 – O algoritmo SIMPLE

Uma das formas de se abordar o problema acoplamento pressão-velocidade é seguindo o princípio dos métodos tipo SIMPLE.

Inicialmente estima-se um campo de pressão p^* e obtém-se através das equações de conservação da quantidade de movimento um campo de velocidades que, a priori, não satisfazem a equação de continuidade. Não faz sentido algum, alterar aleatoriamente o campo de pressão a fim de que em algum momento um campo de velocidade satisfaça a equação de continuidade. O procedimento recomendado comumente é estabelecer expressões de correção para as velocidades em função de gradientes de correção de pressão p' . Quando esta correção de pressão não for mais necessária, estes gradientes de p' serão nulos e a correção sobre velocidades será nula. Para a evolução de p' utiliza-se a equação da continuidade, onde as

equações de correção são introduzidas gerando uma equação para p' com termo fonte envolvendo velocidades.

O algoritmo SIMPLE usa uma relação de correção entre velocidade e pressão e garante que a conservação de massa seja satisfeita. Se a equação de momentum é resolvida com um campo de pressão p^* , o fluxo resultante na face, J_f^* é calculado a partir da equação (A3.26).

$$J_f^* = \widehat{J_f^*} + d_f (p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (\text{A3.26})$$

Visto que a Equação (A3.26) não satisfaz a equação da continuidade, conseqüentemente, uma correção J_f' é adicionada ao fluxo da face J_f^* , tal que o fluxo na face seja obtido corretamente:

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (\text{A3.27})$$

Uma vez satisfeito a equação da continuidade, o algoritmo SIMPLE postula que J_f' seja escrito como:

$$J_f' = d_f (p_{c0}' + p_{c1}') \quad (\text{A3.28})$$

onde p' é a correção da pressão na célula.

O algoritmo SIMPLE substitui a equação de correção de fluxo na equação da continuidade para obter uma equação discreta para correção da pressão p' na célula.

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}' + b \quad (\text{A3.29})$$

onde o termo b é a taxa de fluxos na célula:

$$b = \sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f^* A_f \quad (\text{A3.30})$$

A equação de correção de pressão pode ser resolvida usando o método multi-malha algébrico. Uma solução é obtida para pressão da célula e o fluxo na face é corrigido usando:

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (\text{A3.31})$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p_{c0}' - p_{c1}') \quad (\text{A3.32})$$

Aqui α_p é o fator de sub-relaxação para a pressão. O fluxo da face corrigida, J_f , satisfaz a equação da continuidade discreta durante cada iteração.

A3.20 – O Algoritmo SIMPLEC

O procedimento SIMPLEC é similar ao SIMPLE, a única diferença está na expressão usada para a correção do fluxo na face, J_f' . Como no SIMPLE, a equação de correção pode ser escrita como:

$$J_f' = J_f^* + d_f (p_{c0}' - p_{c1}') \quad (A3.33)$$

Contudo, o coeficiente d_f é redefinido como uma função de $\left(\overline{a_p - \sum_{nb} a_{nb}} \right)$. O uso desta equação de correção modificada tem acelerado a convergência em problemas onde a acoplagem de velocidade-pressão é o impedimento principal na obtenção da solução.

A3.21 – O Algoritmo PISO

O algoritmo PISO (Pressure-Implicite with Splitting of Operators) de acoplagem de pressão-velocidade faz parte dos algoritmos da família SIMPLE. Uma das limitações dos algoritmos SIMPLE e SIMPLEC é que novas velocidades e fluxos correspondentes não satisfazem o balanço de momentum após a equação de correção de pressão ser resolvida. Para melhorar a eficiência deste cálculo, o algoritmo PISO possui duas correções adicionais: correção das vizinhanças e correção “skewness”.

A3.22 – Cálculos com Dependência de Tempo e em Estado Estacionário

No caso de estado estacionário as equações governantes para o resolvidor segregado não contém o termo dependente do tempo. Para o fluxo dependente do tempo (transiente), a forma discretizada das equações de transporte genérica é dada pela equação abaixo:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial T} dV + \oint \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (A3.34)$$

onde:

$\frac{\partial \rho \phi}{\partial T}$ = forma conservativa derivativa transiente da variável ϕ transportada;

ρ = densidade;

$\vec{v}$ = vetor velocidade;

$\vec{A}$ = vetor área superficial;

Γ_ϕ = coeficiente de difusão para ϕ ;

$\nabla\phi$ = gradiente de ϕ ;

S_ϕ = geração de ϕ por unidade de volume.

Como uma aproximação do padrão “default”, todos os termos convectivo, difusivo e fonte são calculados a partir do perfil de tempo no nível $n+1$.

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial T} dV + \oint \rho^{n+1} \phi^{n+1} \vec{v}^{n+1} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi^{n+1} \nabla \phi^{n+1} d\vec{A} + \int_V S_\phi^{n+1} dV \quad (\text{A3.35})$$

A3.23 – A Formulação de Fluxo Frozen

O padrão de discretização completamente implícito da parte convectiva produz termos não lineares na equação resultante. A resolução desta equação geralmente requer muitas iterações por intervalo de tempo. Como uma alternativa, o FLUENT[®] disponibiliza como opção para discretizar a parte convectiva a definição do fluxo de massa na face da célula no nível de tempo anterior “n”.

$$\oint \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint \rho^n \phi^{n+1} \vec{v}^n d\vec{A} \quad (\text{A3.36})$$

A solução possui o mesmo nível de precisão, mas o caráter não linear da equação de transporte discretizada é reduzido e a convergência dentro de cada intervalo de tempo é obtida. Esta opção somente está disponível para problemas transientes de fase simples que usam o resolvidor segregado.

A3.24 – O Resolvedor Acoplado

O resolvidor acoplado disponível no FLUENT[®] resolve equações governantes da continuidade, momentum, energia e transporte de espécies simultaneamente. Equações governantes para escalares adicionais são resolvidas sequencialmente.

ANEXO 4

Perfis de Fração de Volume de Sólidos para as Geometrias de Olazar (2001)

A4 – Perfis de Fração de Volume de Sólidos Para as Geometrias de Olazar (2001)

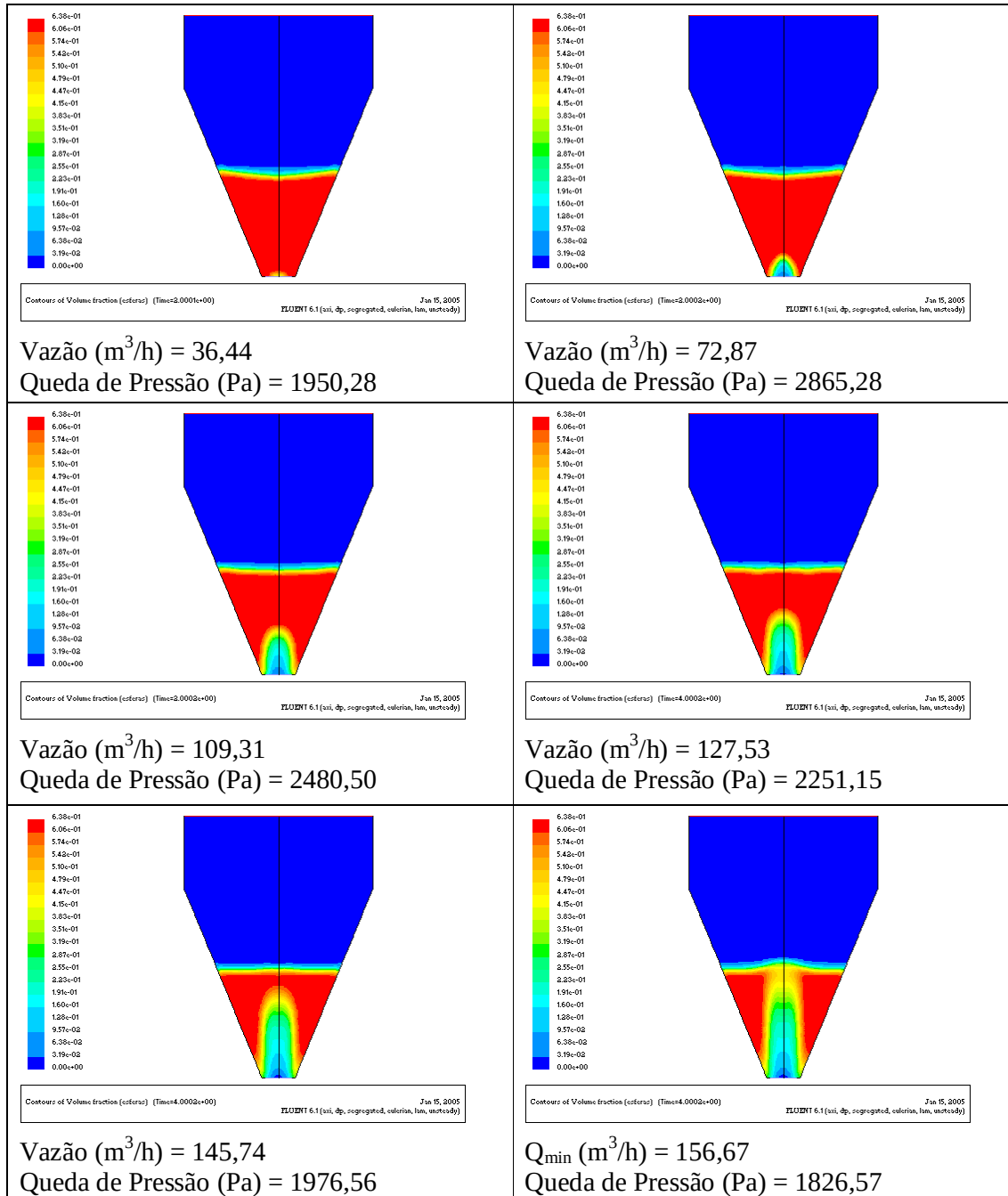
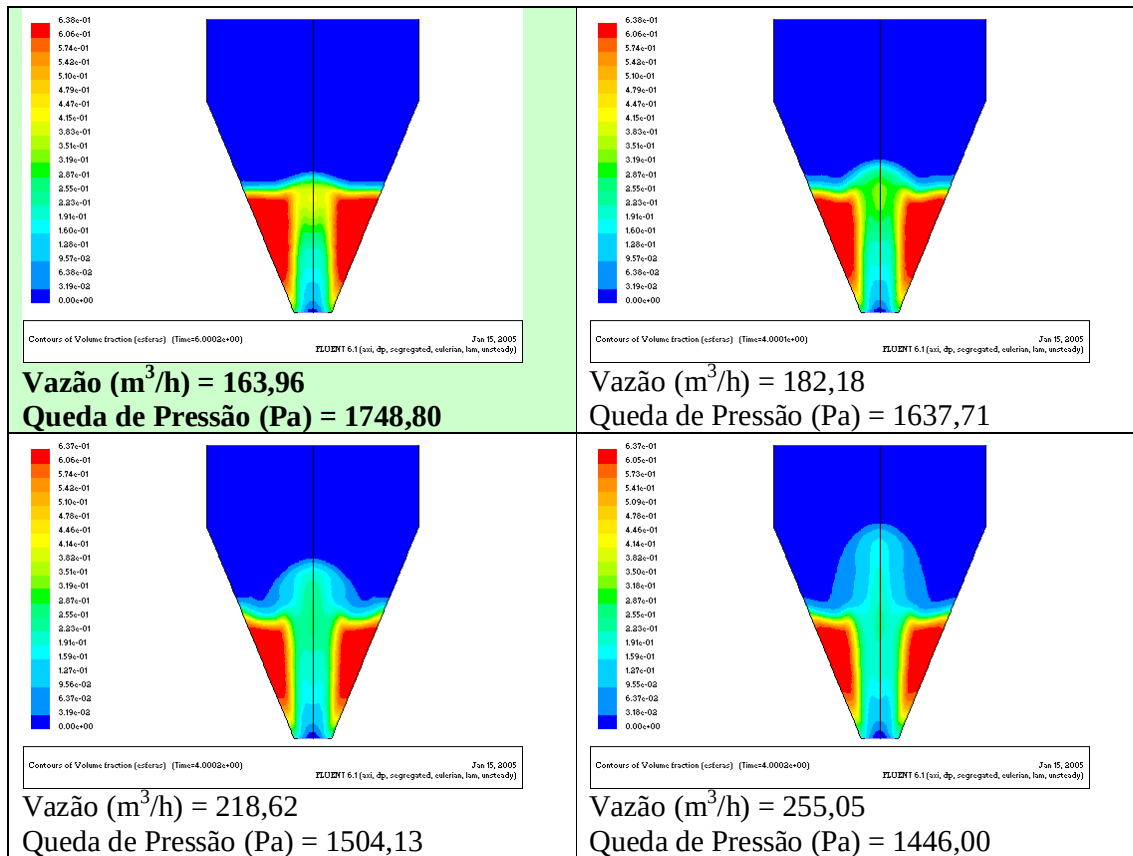


Figura A4.1 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.1.



Cont. Figura A4.1 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.1.

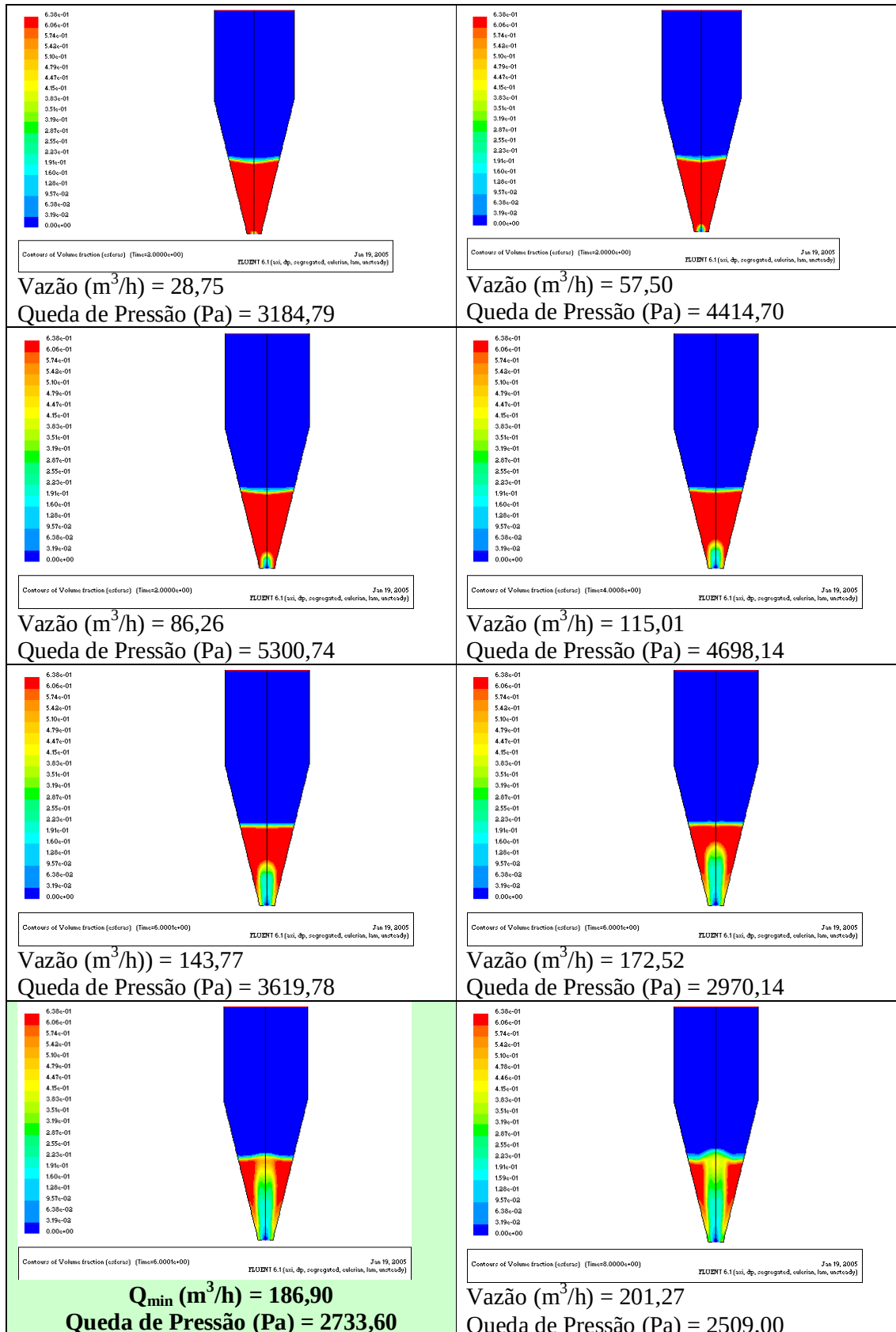
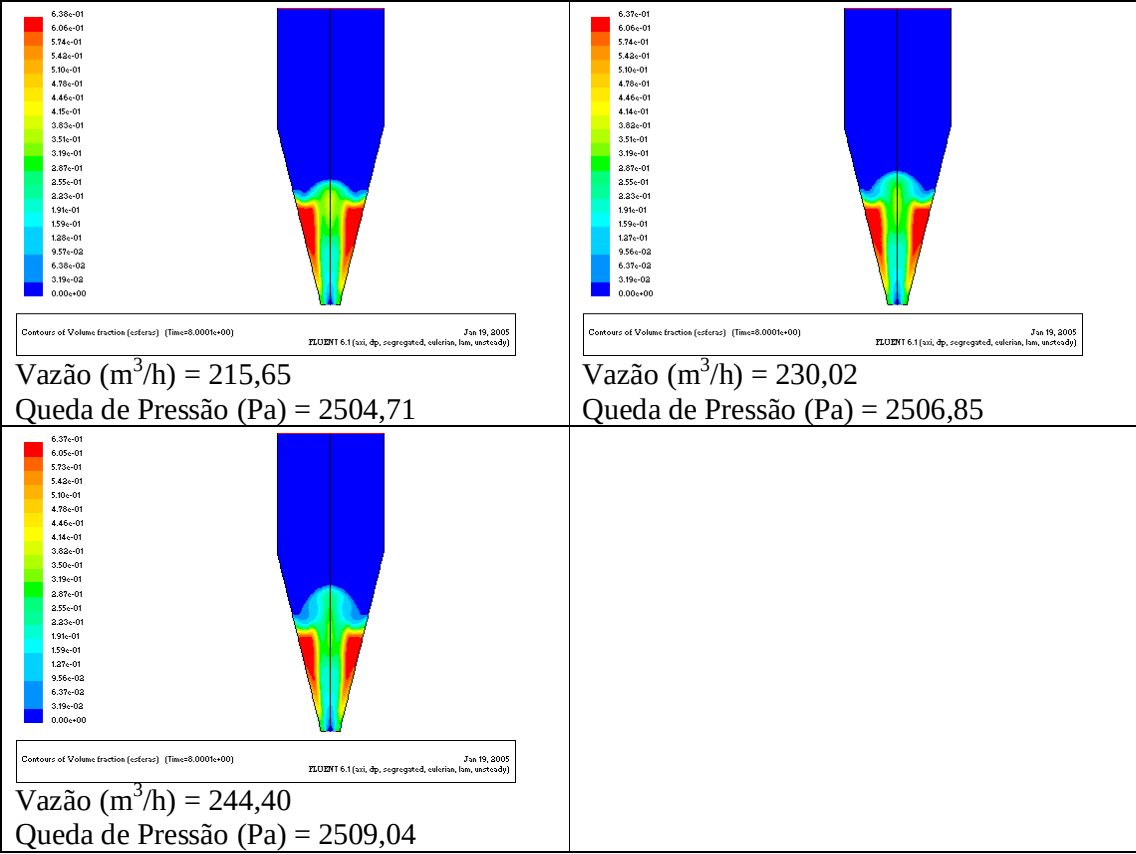


Figura A4.2 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.2.



Cont. Figura A4.2 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.2.

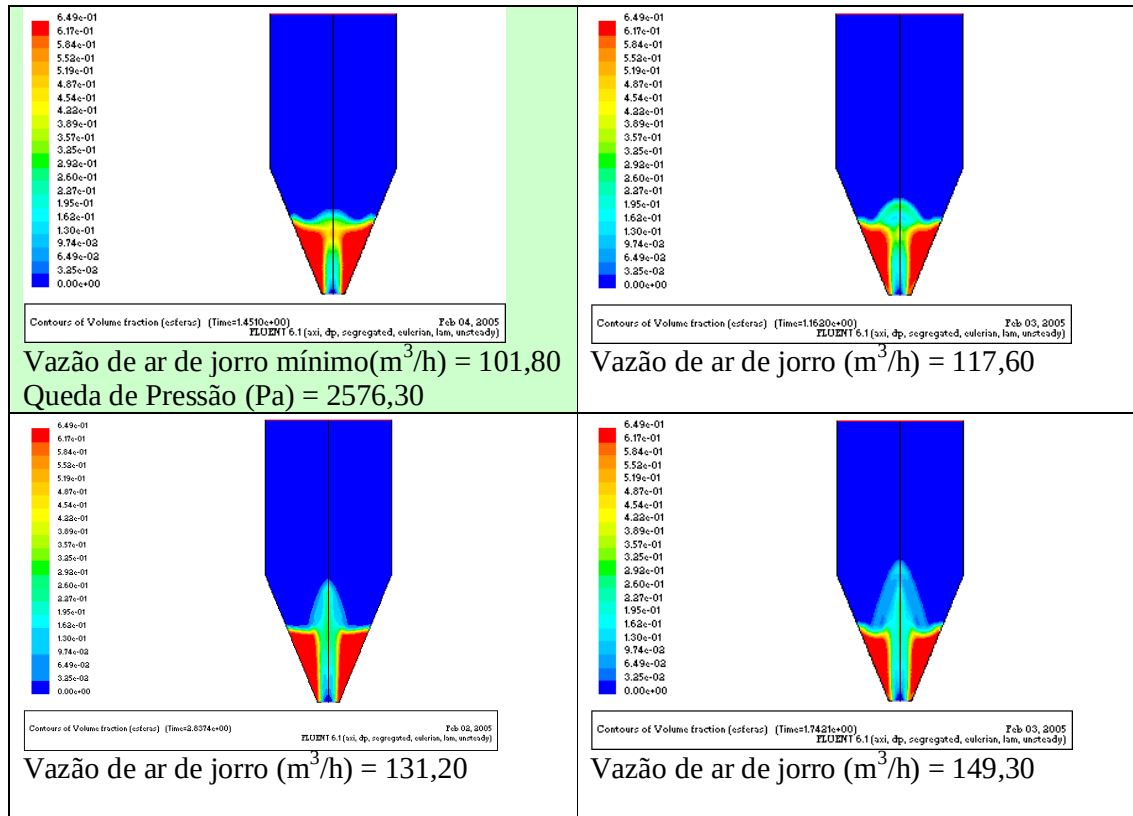


Figura A4.4 – Perfil de fração de volume de sólidos para Cond.3.

ANEXO 5

Diâmetro Médio de Jorro

A5 – DIÂMETRO MÉDIO DE JORRO

A5.1 – Diâmetro de Jorro para He = 0,15 m

Na seqüência são apresentados os resultados de perfil de contornos de fração de volume de sólidos para diferentes condições.

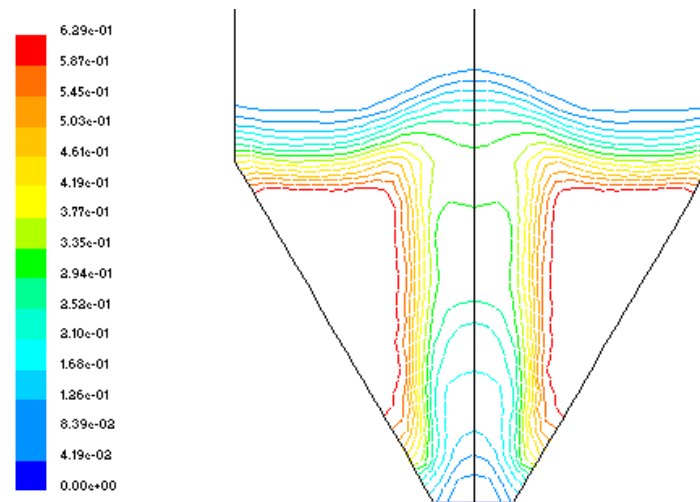


Figura A5.1.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,028 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.1 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,028 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,025	0,050
0,032	0,046
0,043	0,050
0,057	0,048
0,070	0,050
0,081	0,046
0,094	0,044
0,104	0,044
0,113	0,044
0,126	0,046
0,136	0,046
0,145	0,046
0,150	0,048
0,153	0,052
Média	0,047

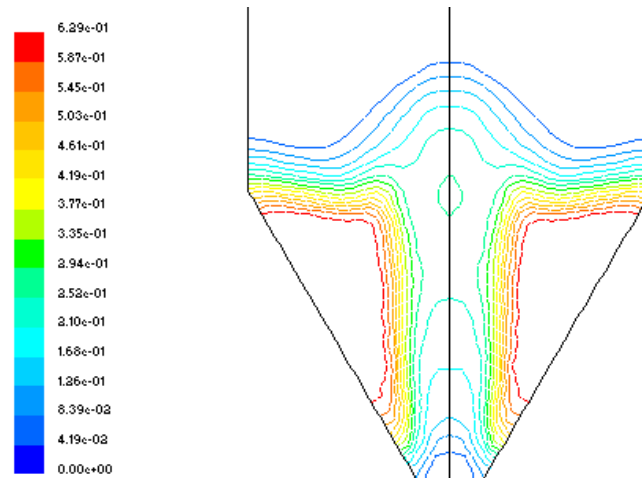


Figura A5.1.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,031$ Kg/s

Tabela A5.2 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,031$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,019	0,042
0,022	0,042
0,025	0,038
0,027	0,040
0,031	0,038
0,037	0,038
0,043	0,040
0,048	0,042
0,055	0,042
0,061	0,042
0,068	0,042
0,075	0,042
0,083	0,042
0,087	0,040
0,095	0,038
0,101	0,038
0,110	0,040
0,116	0,040
0,122	0,040
0,125	0,044
0,131	0,046
0,137	0,048
0,142	0,052
0,149	0,058
Média	0,042

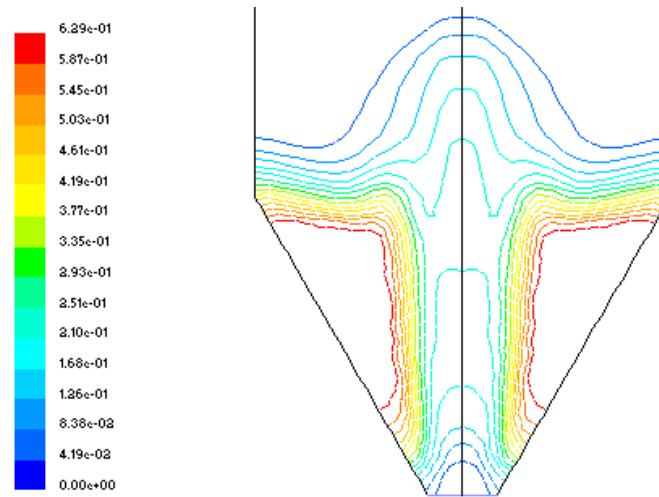


Figura A5.1.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,034 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.3 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,034 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,020	0,046
0,022	0,044
0,025	0,042
0,028	0,040
0,033	0,040
0,038	0,040
0,046	0,040
0,053	0,042
0,059	0,042
0,064	0,042
0,072	0,042
0,077	0,042
0,083	0,044
0,089	0,042
0,094	0,044
0,100	0,044
0,102	0,046
0,105	0,044
0,105	0,044
0,111	0,044
0,115	0,046
0,119	0,046
0,124	0,046
0,131	0,048
0,135	0,052
0,139	0,054
0,143	0,056
0,147	0,060
Média	0,045

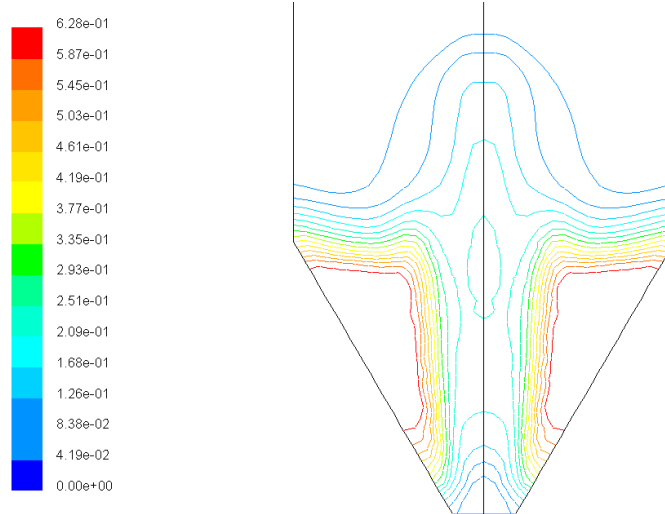


Figura A5.1.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,037 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.4 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,037 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,022	0,042
0,023	0,042
0,026	0,040
0,026	0,044
0,030	0,038
0,030	0,044
0,035	0,040
0,036	0,038
0,039	0,038
0,045	0,038
0,045	0,038
0,052	0,038
0,052	0,038
0,059	0,038
0,067	0,038
0,075	0,038
0,075	0,040
0,083	0,038
0,090	0,040
0,098	0,040
0,100	0,040
0,105	0,038
0,112	0,040
0,112	0,040
0,124	0,044
0,147	0,058
0,151	0,060
0,154	0,066
Média	0,042

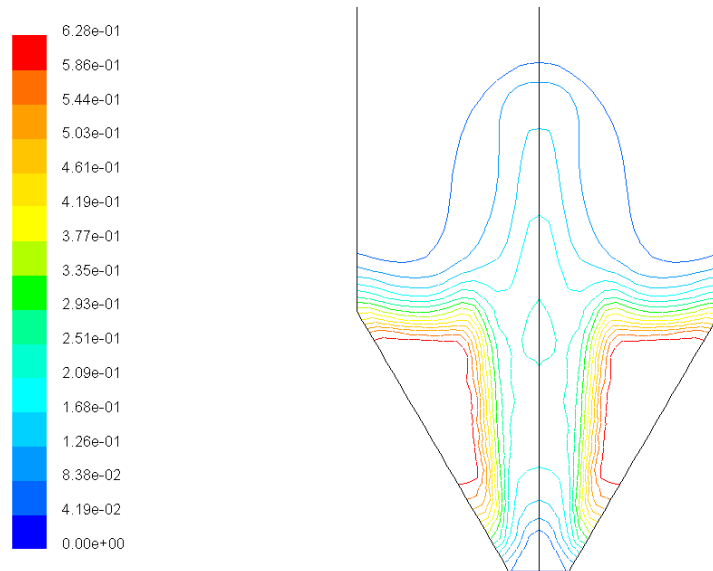


Figura A5.1.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,040$ Kg/s

Tabela A5.5 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,040$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,019	0,046
0,023	0,044
0,027	0,042
0,032	0,042
0,036	0,038
0,040	0,038
0,045	0,040
0,051	0,040
0,057	0,040
0,065	0,040
0,072	0,042
0,080	0,040
0,085	0,042
0,088	0,042
0,092	0,042
0,097	0,042
0,102	0,044
0,107	0,044
0,113	0,046
0,117	0,046
0,123	0,046
0,130	0,050
0,136	0,052
0,138	0,054
0,141	0,056
0,146	0,060
0,149	0,060
0,152	0,066
Média	0,046

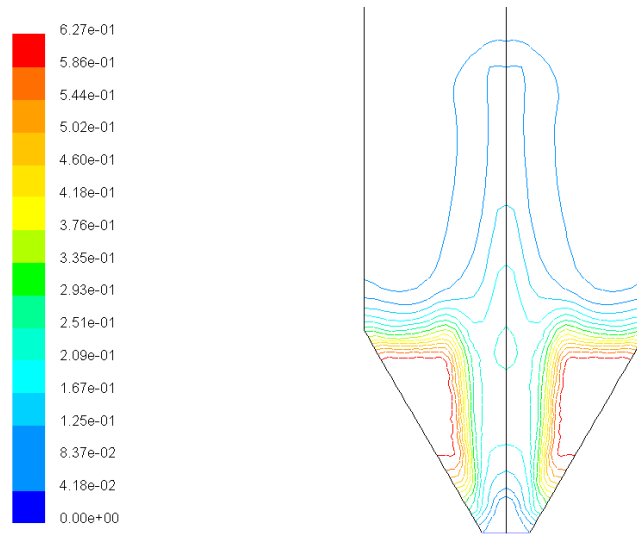


Figura A5.1.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.6 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,026	0,046
0,029	0,046
0,033	0,042
0,038	0,042
0,043	0,040
0,048	0,042
0,053	0,042
0,057	0,042
0,061	0,042
0,065	0,046
0,068	0,042
0,072	0,044
0,076	0,046
0,081	0,046
0,087	0,048
0,093	0,048
0,095	0,048
0,103	0,048
0,108	0,048
0,113	0,048
0,116	0,048
0,122	0,048
0,126	0,048
0,130	0,050
0,133	0,052
0,137	0,056
0,141	0,060
0,145	0,062
0,149	0,066
Média	0,048

A5.2 – Diâmetro de Jorro para He = 0,19 m

Na seqüência são apresentados os resultados de perfil de contornos de fração de volume de sólidos para diferentes condições.

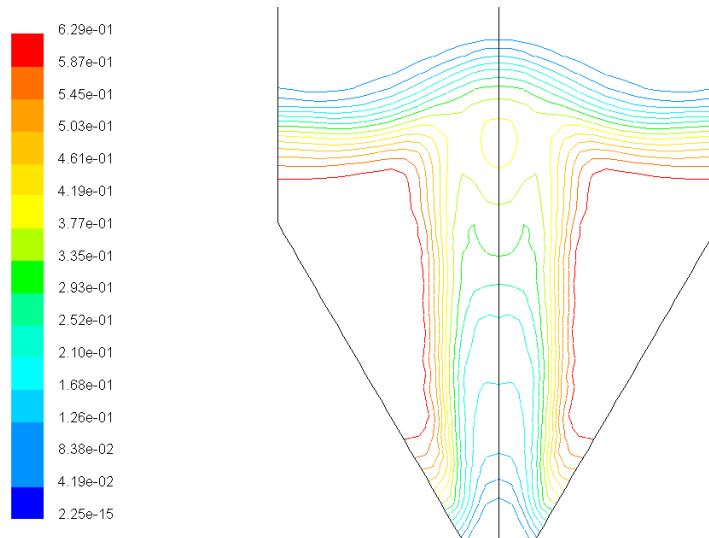


Figura A5.2.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,037 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.7 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,037 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,029	0,048
0,034	0,046
0,041	0,046
0,048	0,046
0,054	0,046
0,061	0,048
0,070	0,050
0,076	0,050
0,083	0,050
0,090	0,050
0,098	0,050
0,104	0,050
0,110	0,050
0,116	0,048
0,123	0,048
0,128	0,048
0,160	0,050
0,165	0,048
0,170	0,050
0,174	0,050
0,180	0,050
0,185	0,050
0,190	0,050
Média	0,049

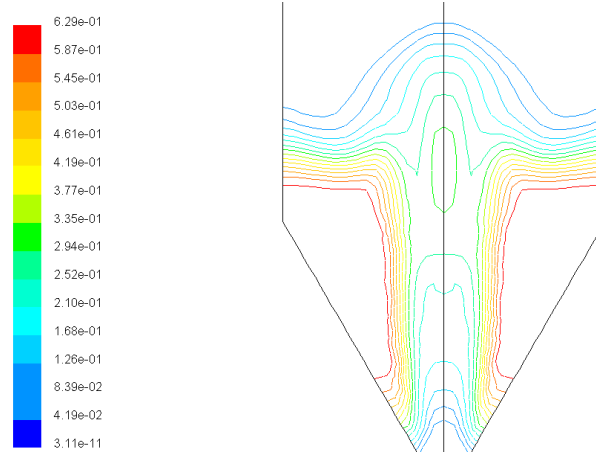


Figura A5.2.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,040 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.8– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,040 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,023	0,050
0,027	0,046
0,032	0,044
0,039	0,042
0,045	0,044
0,053	0,046
0,061	0,046
0,069	0,048
0,075	0,048
0,081	0,050
0,086	0,050
0,092	0,050
0,098	0,050
0,106	0,050
0,113	0,050
0,118	0,050
0,124	0,048
0,129	0,050
0,141	0,050
0,147	0,052
0,152	0,052
0,156	0,054
0,161	0,054
0,166	0,054
0,172	0,056
0,178	0,060
0,182	0,062
0,185	0,066
Média	0,051

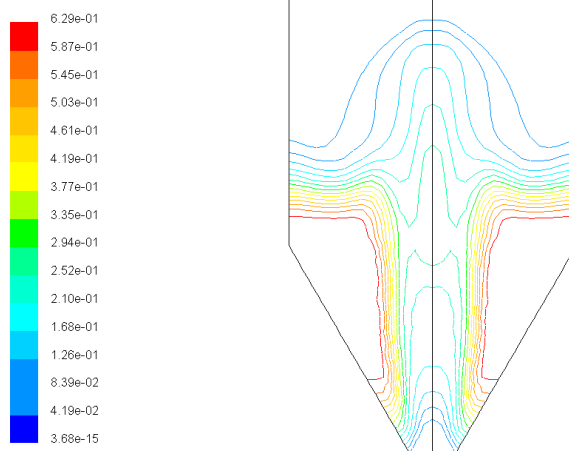


Figura A5.2.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,044$ Kg/s

Tabela A5.9– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,044$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,025	0,056
0,031	0,048
0,037	0,046
0,044	0,046
0,051	0,048
0,062	0,050
0,068	0,048
0,079	0,052
0,088	0,052
0,097	0,052
0,109	0,054
0,119	0,054
0,127	0,052
0,134	0,052
0,141	0,056
0,150	0,056
0,157	0,058
0,166	0,060
0,173	0,062
0,177	0,064
0,182	0,064
0,189	0,076
Média	0,055

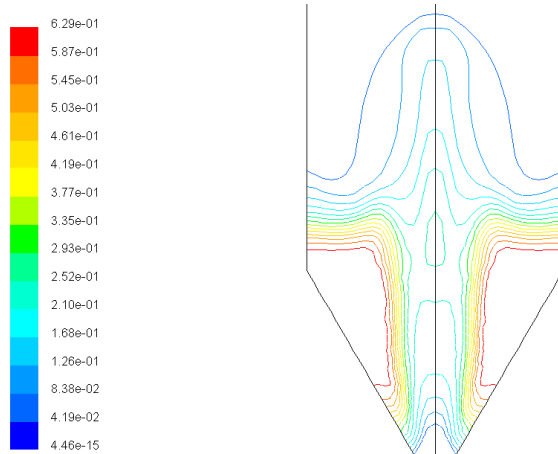


Figura A5.2.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.10– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,027	0,046
0,031	0,046
0,037	0,044
0,045	0,044
0,052	0,044
0,058	0,044
0,065	0,046
0,068	0,046
0,076	0,050
0,083	0,050
0,089	0,050
0,096	0,052
0,104	0,050
0,111	0,052
0,120	0,052
0,131	0,052
0,136	0,052
0,142	0,054
0,146	0,054
0,151	0,054
0,156	0,052
0,162	0,054
0,168	0,052
0,173	0,056
0,177	0,062
0,184	0,066
0,187	0,070
Média	0,052

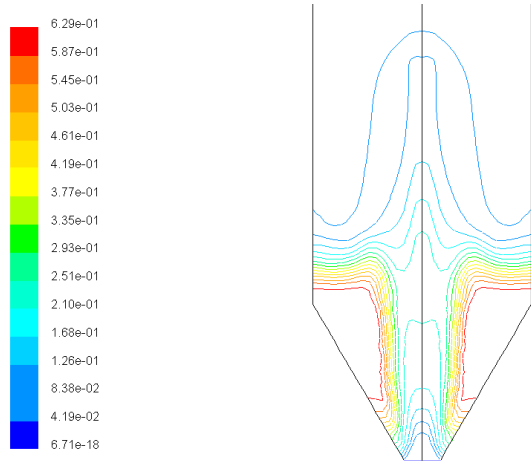


Figura A5.2.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s

Tabela A5.11– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,027	0,052
0,036	0,046
0,044	0,044
0,051	0,044
0,060	0,046
0,068	0,046
0,077	0,050
0,084	0,052
0,091	0,052
0,098	0,052
0,105	0,050
0,114	0,052
0,124	0,050
0,133	0,052
0,140	0,052
0,144	0,056
0,147	0,056
0,153	0,052
0,158	0,056
0,164	0,058
0,170	0,060
0,176	0,064
0,180	0,066
0,185	0,072
Média	0,053

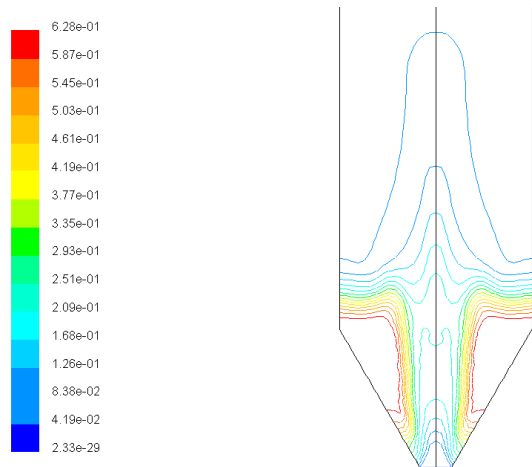


Figura A5.2.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.12 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,033	0,046
0,041	0,046
0,048	0,042
0,057	0,046
0,065	0,048
0,075	0,050
0,081	0,050
0,092	0,050
0,102	0,052
0,111	0,052
0,122	0,052
0,130	0,056
0,136	0,056
0,141	0,058
0,149	0,056
0,155	0,058
0,161	0,062
0,170	0,062
0,172	0,066
0,175	0,066
0,183	0,072
Média	0,054

A5.3 – Diâmetro de Jorro para He = 0,22 m

Na sequência são apresentados os resultados de perfil de contornos de fração de volume de sólidos para diferentes condições.

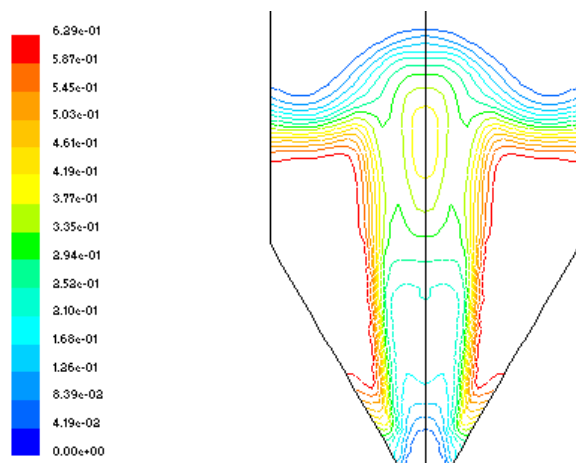


Figura A5.3.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,047$ Kg/s

Tabela A5.13 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,047$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,030	0,043	0,112	0,059
0,035	0,043	0,120	0,059
0,043	0,049	0,127	0,059
0,047	0,047	0,127	0,059
0,049	0,049	0,138	0,059
0,055	0,047	0,145	0,058
0,055	0,049	0,151	0,058
0,059	0,051	0,156	0,058
0,060	0,051	0,163	0,054
0,062	0,049	0,169	0,054
0,063	0,049	0,176	0,054
0,069	0,053	0,186	0,056
0,069	0,050	0,196	0,058
0,074	0,053	0,202	0,058
0,075	0,051	0,208	0,060
0,080	0,055	0,215	0,062
0,087	0,055	0,221	0,066
0,096	0,057	0,226	0,068
0,103	0,057	0,228	0,071
Média = 0,055			

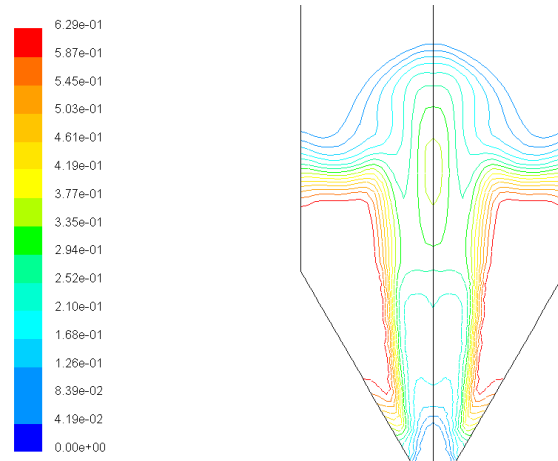


Figura A5.3.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s

Tabela A5.14 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,025	0,047	0,142	0,056
0,030	0,043	0,143	0,057
0,036	0,044	0,145	0,056
0,042	0,047	0,146	0,056
0,048	0,044	0,150	0,056
0,049	0,047	0,153	0,054
0,053	0,047	0,154	0,054
0,059	0,049	0,158	0,051
0,066	0,048	0,162	0,051
0,071	0,049	0,169	0,050
0,076	0,050	0,176	0,051
0,080	0,052	0,182	0,051
0,088	0,054	0,192	0,056
0,097	0,056	0,201	0,058
0,102	0,056	0,208	0,061
0,114	0,058	0,216	0,065
0,124	0,056	0,223	0,070
0,128	0,058	0,228	0,075
0,138	0,058		
Média = 0,054			

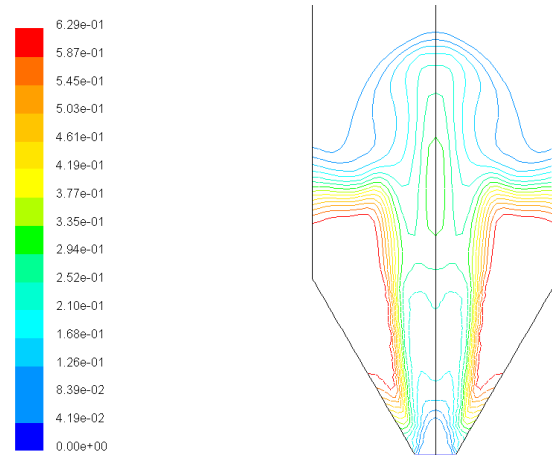


Figura A5.3.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.15 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,025	0,046	0,130	0,059
0,029	0,044	0,136	0,059
0,033	0,044	0,144	0,061
0,039	0,046	0,152	0,060
0,046	0,046	0,157	0,059
0,054	0,046	0,162	0,056
0,061	0,049	0,167	0,056
0,068	0,049	0,172	0,056
0,076	0,051	0,180	0,059
0,082	0,051	0,187	0,059
0,091	0,054	0,194	0,061
0,095	0,054	0,201	0,063
0,100	0,056	0,206	0,066
0,110	0,056	0,213	0,069
0,115	0,059	0,218	0,073
0,115	0,059	0,218	0,074
0,124	0,059	0,223	0,077
Média = 0,057			

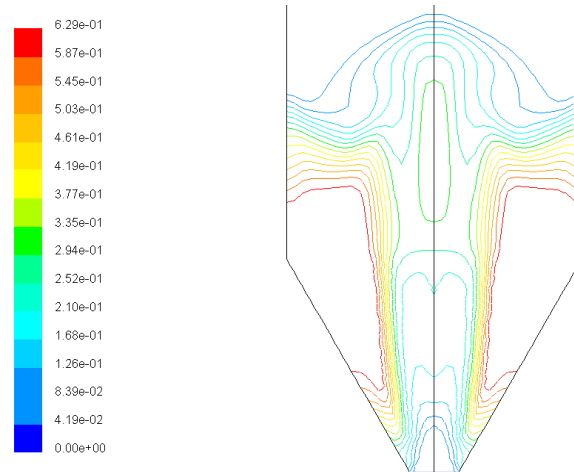


Figura A5.3.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,056 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.16 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,056 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,026	0,047	0,147	0,060
0,030	0,045	0,151	0,058
0,034	0,044	0,156	0,054
0,038	0,045	0,161	0,052
0,039	0,045	0,168	0,049
0,045	0,045	0,172	0,049
0,053	0,046	0,178	0,049
0,059	0,047	0,182	0,049
0,069	0,051	0,184	0,052
0,078	0,053	0,191	0,053
0,086	0,055	0,196	0,056
0,093	0,056	0,200	0,058
0,099	0,057	0,204	0,060
0,106	0,058	0,207	0,060
0,111	0,059	0,212	0,062
0,117	0,060	0,216	0,062
0,124	0,058	0,218	0,066
0,131	0,060	0,221	0,067
0,137	0,059	0,225	0,070
Média = 0,055			

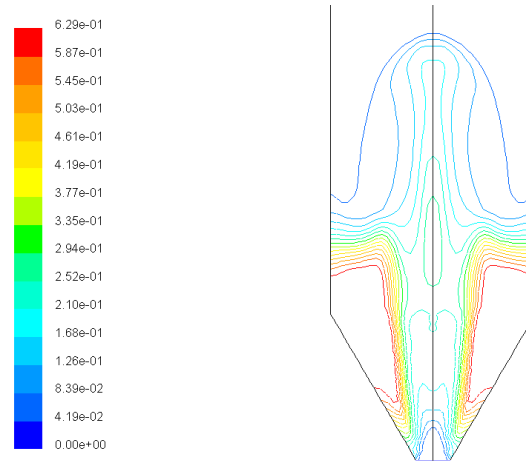


Figura A5.3.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,059 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.17 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,059 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,029	0,044	0,148	0,064
0,034	0,046	0,151	0,064
0,041	0,046	0,155	0,064
0,048	0,047	0,160	0,064
0,054	0,044	0,162	0,063
0,055	0,046	0,167	0,063
0,055	0,048	0,170	0,063
0,064	0,049	0,174	0,063
0,072	0,052	0,178	0,063
0,080	0,054	0,183	0,063
0,088	0,056	0,186	0,064
0,097	0,056	0,191	0,065
0,103	0,058	0,196	0,068
0,109	0,059	0,196	0,069
0,115	0,059	0,201	0,071
0,121	0,061	0,204	0,072
0,126	0,059	0,208	0,075
0,135	0,064	0,212	0,076
0,139	0,064	0,215	0,078
0,144	0,066	0,216	0,081
Média = 0,059			

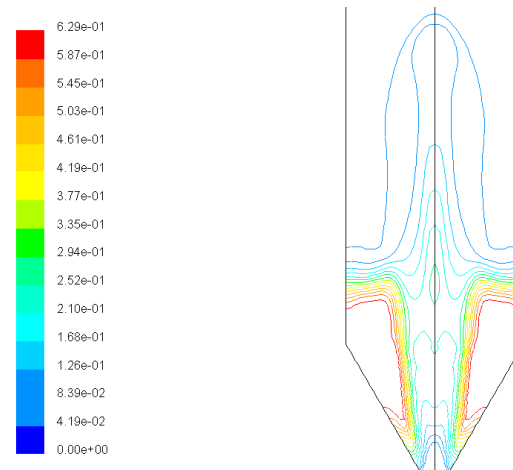


Figura A5.3.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,062 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.18 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,062 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,026	0,048	0,139	0,066
0,030	0,045	0,144	0,066
0,036	0,045	0,148	0,067
0,042	0,047	0,151	0,066
0,047	0,046	0,156	0,067
0,047	0,047	0,160	0,067
0,054	0,047	0,164	0,067
0,060	0,048	0,168	0,067
0,066	0,051	0,173	0,068
0,070	0,053	0,176	0,069
0,078	0,055	0,181	0,070
0,085	0,055	0,184	0,071
0,093	0,055	0,188	0,071
0,098	0,057	0,192	0,072
0,105	0,058	0,197	0,072
0,110	0,059	0,202	0,074
0,115	0,059	0,206	0,079
0,122	0,061	0,210	0,080
0,127	0,062	0,214	0,083
0,134	0,064	0,218	0,086
0,139	0,065	0,220	0,090
Média = 0,063			

A5.4 – Diâmetro de Jorro para He = 0,25 m

Na sequência são apresentados os resultados de perfil de contornos de fração de volume de sólidos para diferentes condições.

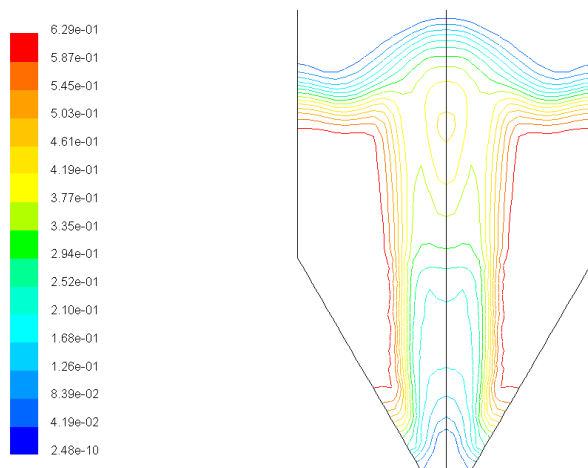


Figura A5.4.1 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,050$ Kg/s

Tabela A5.19 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,050$ Kg/s

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,041	0,055	0,163	0,055
0,048	0,055	0,168	0,055
0,055	0,053	0,175	0,055
0,063	0,055	0,180	0,055
0,074	0,057	0,184	0,055
0,080	0,057	0,190	0,055
0,089	0,059	0,197	0,055
0,097	0,059	0,203	0,055
0,104	0,060	0,209	0,055
0,110	0,059	0,214	0,057
0,119	0,059	0,221	0,058
0,127	0,059	0,227	0,059
0,134	0,059	0,235	0,059
0,143	0,059	0,242	0,062
0,149	0,059	0,249	0,063
0,154	0,057	0,257	0,068
0,157	0,057		
Média = 0,057			

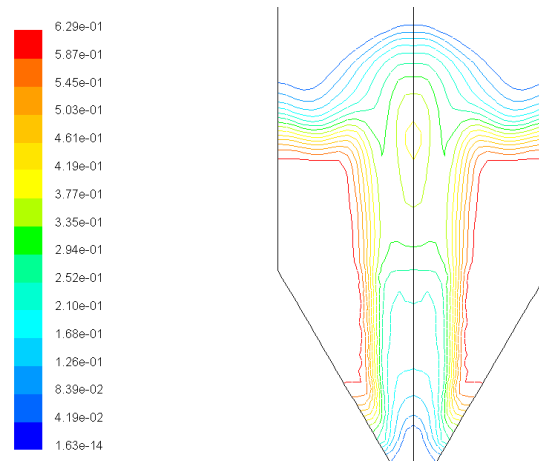


Figura A5.4.2 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.20 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,053 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,036	0,054	0,148	0,057
0,038	0,052	0,155	0,056
0,043	0,052	0,161	0,057
0,049	0,052	0,166	0,054
0,053	0,052	0,173	0,052
0,059	0,052	0,181	0,051
0,064	0,054	0,187	0,052
0,070	0,056	0,194	0,052
0,075	0,056	0,200	0,053
0,080	0,054	0,205	0,053
0,082	0,057	0,211	0,054
0,086	0,057	0,218	0,054
0,091	0,057	0,224	0,057
0,097	0,056	0,230	0,059
0,104	0,057	0,233	0,061
0,112	0,057	0,238	0,064
0,119	0,057	0,244	0,066
0,127	0,057	0,250	0,068
0,136	0,058	0,259	0,077
0,142	0,058		
Média = 0,056			

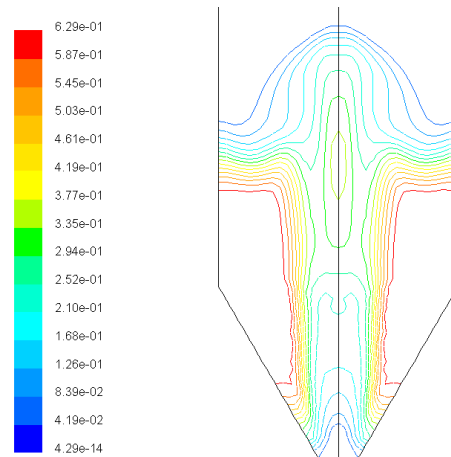


Figura A5.4.3 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,056 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.21 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,056 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,040	0,054	0,139	0,060
0,047	0,054	0,139	0,060
0,053	0,055	0,147	0,059
0,060	0,054	0,153	0,061
0,070	0,056	0,163	0,059
0,074	0,056	0,171	0,056
0,075	0,057	0,171	0,057
0,081	0,056	0,178	0,056
0,082	0,056	0,186	0,054
0,090	0,056	0,194	0,056
0,096	0,056	0,206	0,054
0,096	0,057	0,214	0,059
0,103	0,056	0,220	0,061
0,103	0,057	0,228	0,061
0,115	0,056	0,234	0,064
0,115	0,059	0,242	0,069
0,124	0,059	0,249	0,072
0,133	0,059	0,257	0,077
Média = 0,059			

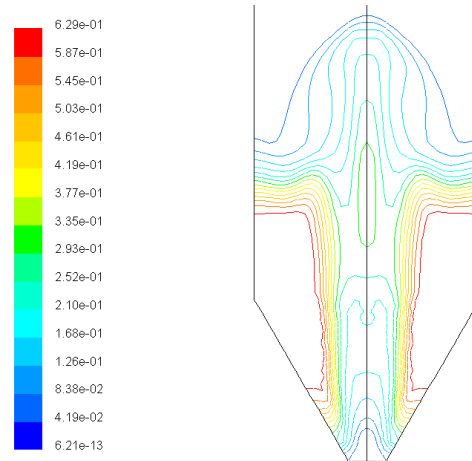


Figura A5.4.4 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,059 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.22 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,059 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,047	0,059	0,155	0,062
0,051	0,057	0,165	0,061
0,059	0,055	0,173	0,062
0,069	0,055	0,180	0,059
0,076	0,057	0,190	0,059
0,084	0,057	0,197	0,062
0,093	0,059	0,207	0,062
0,102	0,059	0,216	0,065
0,111	0,059	0,223	0,065
0,115	0,057	0,231	0,068
0,117	0,061	0,240	0,071
0,126	0,059	0,245	0,076
0,136	0,062	0,251	0,079
0,147	0,062		
Média = 0,062			

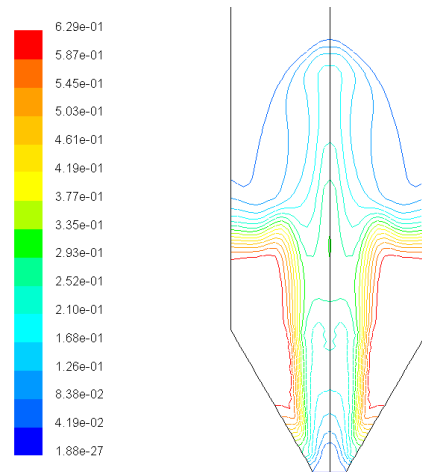


Figura A5.4.5 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,062 \text{ Kg/s}$

A5.23– Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,062 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,059	0,059	0,165	0,064
0,068	0,059	0,173	0,062
0,077	0,059	0,179	0,062
0,084	0,059	0,185	0,062
0,093	0,059	0,192	0,062
0,100	0,059	0,198	0,064
0,103	0,059	0,206	0,062
0,105	0,060	0,214	0,065
0,111	0,060	0,219	0,065
0,112	0,060	0,223	0,068
0,117	0,062	0,233	0,072
0,125	0,062	0,236	0,072
0,135	0,062	0,239	0,075
0,141	0,065	0,244	0,076
0,148	0,065	0,250	0,081
0,157	0,065		
Média = 0,064			

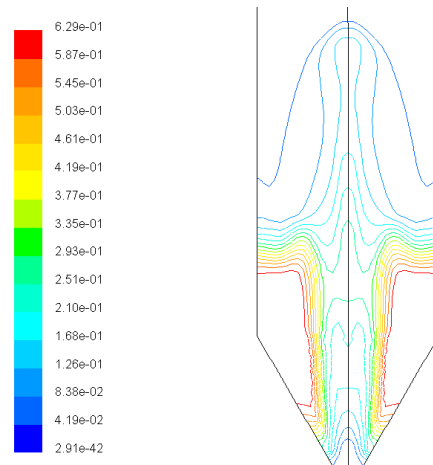


Figura A5.4.6 – Perfil de contorno de fração de volume de sólidos $Q_g = 0,065 \text{ Kg/s}$

Tabela A5.24 – Diâmetro de jorro para diferentes alturas com $Q_g = 0,065 \text{ Kg/s}$

Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)	Altura (m)	Diâmetro de jorro (m)
0,046	0,055	0,158	0,066
0,051	0,055	0,164	0,066
0,058	0,053	0,169	0,064
0,065	0,057	0,175	0,064
0,070	0,057	0,181	0,066
0,078	0,057	0,189	0,066
0,082	0,059	0,193	0,066
0,089	0,060	0,201	0,065
0,097	0,060	0,207	0,066
0,106	0,061	0,214	0,067
0,114	0,061	0,219	0,068
0,120	0,062	0,224	0,070
0,126	0,061	0,229	0,071
0,132	0,062	0,234	0,074
0,139	0,064	0,237	0,075
0,143	0,066	0,241	0,078
0,144	0,066	0,246	0,082
0,150	0,066	0,250	0,084
0,152457	0,064066		
Média = 0,065			

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTEMANI, C. A. C., Método dos Volumes de Controle, Notas de aula, Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- ATAÍDE, C.H., Estudo do recobrimento de comprimidos em leitos de jorro e jorro-fluidizado. Campinas, UNICAMP, Departamento de Engenharia Química, 1996. 188p. (Tese, Doutorado)
- BARREIRA, N.B., Introdução à modelagem em 3d para reatores *air-lift* empregando o “método dos volumes finitos” na resolução da fluidodinâmica (*cf*d), Campinas, UNICAMP, Departamento de Engenharia Química, 2003. 302p. (Tese, Doutorado)
- BARROZO, M.A.S., Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. São Carlos, UFSCar, Departamento de Engenharia Química, 1995. 163p. (Tese, Doutorado)
- BATAGLIA, O. C., MASCARENHAS, H. A. A., Nutrição mineral da soja, a soja no Brasil central - Fundação Cargill, Vol. 1, p. 113 – 133, 1986.
- BENKRID, A. and CARAM, H.S., Solid flow in the annular region of a spouted bed, *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 35, p.1328-1336, 1989.
- BOX, M.J., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S., Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building. John Wiley and Sons, New York. 1978.
- BOX, G.E., WILSON, K. B., On the experimental attainment of optimum conditions. *J. Roy. Statist. Soc. B* 13, 1. 1951. Citado em MYERS, R. H.
- CHAPMAN, S. and COWLING, T.G., The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge University Press, Cambridge, England, 3rd edition, 1990.
- CASSANELLO, LARACHI, M., F., LEGROS, R. and Chaouki, J., Solids dynamics from experimental trajectory time-series of a single particle motion in gas-spouted beds, *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, Issues 13-14, p. 2545-2554, 1999.

- CONCEIÇÃO FILHO, R. S., Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes em leito de jorro, Uberlândia, UFU, Departamento de Engenharia Química, 1997. 58p. (Dissertação, Mestrado)
- Du, W., Bao, X., Xu, J. and Wei, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations, Chemical Engineering Science, In Press, Available online 11 October 2005.
- DUARTE, C.R., O uso de modelo de balanço populacional no estudo de inoculação de sementes de soja em leito de jorro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 145p., 2002.
- ERGUN, S., Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog., Vol. 48(2), p. 89-94, 1952.
- FREIRE, J. T., SARTORI, D. J. M. Editores, Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos, Editora da UFSCar, 330p, 1992.
- FREIRE, J.T. e OLIVEIRA, W.P., Aspectos Tecnológicos dos Processos de Recobrimento de Partículas, Tópicos Especiais em Secagem;, Gráfica da UFSCar, São Carlos-SP, Vol.1, p.253- 293,1992.
- GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., and Ding, J., Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, p. 75-82, 1992.
- HARRIS, C. K., ROEKAERTS, D. and ROSENDAL, F.J.J., Computacional Fluid Dynamics for Chemical Reactor Engineering, Chemical Engineering Science, Vol. 51, p.1569-1594, 1996.
- HE, Y. L., LIM, C.J., GRACE, J.R. and ZHU, J.X., Measurements of Voidage Profiles in Spouted Beds, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 72, p.229-234, 1994.
- HIMMELBLAU, M. B., KENNETH, B., Process Analysis and Simulation, John Wiley & Sons. Inc., New York - London, p.59-83, 1967.
- HJORTSO, M. A. and NIELSEN, J., Population balance models of autonomous microbial oscillations, Journal of Biotechnology., Vol 42, p.255-269, 1995.

- HOUNSLOW, M. J., RYALL, R. L. and MARSHALL, V. R., A Discretized Population Balance for Nucleation, Growth, and Aggregation, AIChE Journal, Vol. 34, p.1821-1832, 1988.
- HOUNSLOW, M. J., WYNN, J. W., Short-Cut Models For Particulate Process, AIChE Journal, Vol. 17, p.505-516, 1993.
- HUNGRIA, M., VARGAS, A. T., CAMPO, R. J., A Inoculação da Soja. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 28p., 1997
- ISHIKURA, T., NAGASHIMA, H., IDE, M., Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particules, Powder Technology, Vol. 131, p.56-65, 2003.
- KAPUR, P. C., Kinetics of granulation by non-random coalescence mechanism, Chemical Engineering Science, Vol. 27, p. 1863-1869, 1972.
- KVALE, S., JAKOBSEN, H.A., ASBJORSEN, O. A., and OMTVEIT, T., Size fraction of gas-filled microespheres by flotation, Separations Technology, Vol. 6, p. 219-226, 1996.
- KAWAGUCHI, T. and TSUJI, T. T., Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method (compararison between the two-and-three-dimesional models), Powder Technology, Vol. 96, p.129-138, 1998.
- KAWAGUCHI, T., SAKAMOTO, M. and TSUJI, T. T., Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, Powder Technology, Vol. 109, p.3-12, 2000.
- LADEIRA, J. F. M. e PASSOS, M. L., A simulação do escoamento do fluido em leitos de jorro com tubo interno, Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, Vol. 21 (1), p.147-155, 2002.
- LARACHI, F., BERNARD, P., GRANDJEAN, A. and CHAOUKI, J., Mixing and circulation of solids in spouted beds, Chemical Engineering Science, Vol.10, p. 1-11, 2002.
- LEFROY, G. A. and DAVIDSON, J.F., The mechanism of spouted beds, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 47, p.120-128, 1969.
- LE MOS, M. J.S. Introdução ao CFD – Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor Computacional, SMARTtech Serviços e Sistemas Ltda. São Paulo, p.1-103, 2002.

- LIN, C.C., and FAN, L.T., Age distribution for Flow Systems, The Canadian Journal of Chemical Engineering, April, p 62-66, 1963.
- LIU, L.X., and LISTER, J.D., Population Balance Modelling of Fertilizer Granulation, International Symposium on Agglomeration, Brighton, England, p. 611-621, 1989.
- LIU, L.X., and LISTER, J.D., Coating Mass Distribution from a Spouted Bed Seed Coater: Experimental and Modeling Studies, Powder Technology, Vol. 74, p. 259-270, 1992.
- LIU, L. X. and LISTER, J. D. Spouted bed seed coating: the effect of process variables on maximum coating rate and elutriation, Powder Tecnology, Vol. 36, p 422-442, 1993.
- LOURENÇO, R. O., Identificação e monitoramento de regimes em leito de jorro convencional, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 105p., 2006.
- LUCAS, K. B. C., Inoculação de sementes de soja e recobrimento com micronutrientes em leito de jorro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 90p., 2000.
- McNAB, G. S., Prediction of spout diameter, *Brit. Chem. Eng. Pro. Tech.*, Vol. 17, 532, 1972.
- MALEK, M. A., MADONNA, L. A., e LU, B. C. Y., Estimation of spout diameter in a spouted bed, *Ind. Eng. Chem. Process Des.* Vol. 2, 30, (1963).
- MARCOS FILHO, J., CICERO, S. M., SILVA, W. R. Avaliação da qualidade de sementes. Ed. Da Fundação de Estudos Agrários Luís de Queiroz. Piracicaba – SP. 1996.
- MATHUR, K. B. and EPSTEIN, N., Spouted Beds , Academic Press Inc. LTD., New York, 304p., 1974.
- MATHUR, K. B. and GISHLER, N., A technique for contacting gases with coarse solid particles , *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 1, p.157-164, 1955.
- MIKHAILIK, V. D., The pattern of change of spout diameter in a spouting bed. Collected works on “research on heat and mass transfer in technological process”, Nauka I Tekhnika BSSR, Minsk, p. 37, 1966.
- MIYASAKA, S. Generalidades, A soja no Brasil central – Fundação Cargill, p. 1-20, 1986.
- MORSI, S. A. and ALEXANDER, A. J., An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *J. Fluid Mech.*, Vol. 55(2), p.193-208, 1972.

- MYERS, R. H., Response surface methodology. Ann Arbor, Mich.: Edwards Brothers (Distributors), Virginia, 1976.
- OGINO, F., L. ZHANG and Y. MAHASHI, Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed. *Inter. Chem. Eng. of Japan* 33(2):265-272, 1993.
- OLAZAR, M., SAN JOSÉ, M.J., IZQUIERDO, M.A., SALAZAR, A.O. and BILBAO, J., Effect of operation conditions on solid velocity in spout, annulus and fountain of spouted beds, *Chemical Engineering Science*, Vol.56, p.3585-3594, 2001.
- PASSOS, M.L., OLIVEIRA, L.S., FRANCA, A.S., FREITAS, M.E.A., MASSARANI, G. and BARROZO, M.A.S. Spouted Bed Units for Anatto Powder Production, *Inter-American Drying Conference*, Itu-SP, Brazil, Vol. A, p. 181-188, 1997.
- PATANKAR, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PICCININI, N., ROVERO, G. Thick coatings by thermo-chemical deposition in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 61, p. 448-451, 1983.
- PICOLLO, S.V., ROCHA, S.C.S. e QUEIROZ FILHO, A.V., Análise da cinética do recobrimento de comprimidos em leito de jorro bidimensional para atomização da solução no topo, no fundo e na base angulada do leito, *Anais do XXV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos*, São Carlos-SP, Vol. II, p. 540-554, 1997.
- RAMKRISHNA, D., Reviews in chemical engineering - The status of population balances, *School of Chemical Engineering, University of Purdue, Indiana*, p. 49 – 95, 1985.
- RANDOLPH, A. D. and LARSON, M. A., Theory of particulate processes, *Department of Chemical Engineering, University of Arizona, Tucson*, 367p., 1971.
- ROBINSON, T. and WALDIE, B., Growth rate of particles in a spouted bed granulator, *Trans. Institute Chemical Engineering*, Vol 57, 121p., 1979.
- ROY, D., LARACHI, F., LEGROS. R. and CHAOUKI, J., A study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, p. 945-952, 1994.

- SAN JOSE, M.J., M. OLAZAR, R. AGUADO, and J. BILBAO, Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted beds. *Chem. Eng. J.* 62 (2):113-120, 1996.
- SCHILLER, L. and NAUMANN Z., *Ver. Deutsch. Ing.*, p. 77-318, 1935.
- SEYSSIECQ, I., VEESLER, S., MANGIN, D., KLEIN, P. J., BOISTELLE., R., Modelling Gibbsite Agglomeration in a Constant Supersaturation Crystallizer, *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, p. 5565-5578, 2000.
- SILVA, M.A.L., Simulação de Escoamentos Aerodinâmicos Turbulentos e Compressíveis, Usando os Modelos de Euler, de Navier-Stokes e o de Baldwin-Lomax, , Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 145p., 1996.
- SYAMLAL, M., ROGERS, W. and O'BRIEN, T. J., MFIX documentation: Vol. 1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993.
- SYAMLAL, M. and O'BRIEN, T. J., Computer simulation of bubbles in a fluidized bed, *AIChE Symp. Series*, Vol. 85, p. 22-31, 1989.
- UEMAKI, O., R.YAMADA, and M. KUGO, Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures. *Can. J. Chem. Eng.* 61:303-307, 1983.
- WEISS, J. P., MEISEN, A. Laboratory studies on sulphur – coating urea by the spouted bed process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 61, p. 440-447, 1983.
- WEN, C.Y. and YU, Y. H., Mechanics of fluidization, *Chem. Eng. Prog. Symp.Series*, Vol. 62, p. 100-111, 1966.
- YOKOGAWA, A., MEISEN, A. *JSME J.* Vol. 36 (287), p. 1117-1125, 1970. (in japanese)