



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



**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA
DE UM LEITO DE JORRO COM TUBO *DRAFT***

José Luiz Vieira Neto

Uberlândia

2007



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



**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA
DE UM LEITO DE JORRO COM TUBO *DRAFT***

José Luiz Vieira Neto

Orientador : Marcos Antônio de Souza Barrozo

Co-Orientadora : Valéria Viana Murata

**Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química, área de concentração em
Pesquisa e Desenvolvimento de Processos
Químicos.**

Uberlândia - MG

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

V658e Vieira Neto, José Luiz.

Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo *Draft* / José Luiz Vieira Neto . - 2007.
102 f. : il.

Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo.

Co-orientadora: Valéria Viana Murata.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Processo de leito de jorro - Teses. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza. II. Murata, Valéria Viana. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.047.79

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

Aos meus pais, José Luiz e Dalva,
às minhas irmãs, Andreia e Aline,
e à minha noiva Adriana,
que sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por tudo que Ele tem me proporcionado.
Aos meus pais que, mesmo distantes, sempre me deram todo apoio que precisei.
Às minhas irmãs Andreia e Aline, e à minha noiva Adriana, pela paciência, estímulo
e incansável compreensão.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo pela paciência,
dedicação e permanente incentivo. Pelo que tem me ensinado como um pai instrui um filho.

À co-orientadora Prof.ª Dra. Valeria Viana Murata e ao Prof. Dr. Cláudio Roberto
Duarte, por todo o apoio durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química, pelo
companheirismo durante todos esses anos.

Aos alunos de iniciação científica, Jonatas, Marco Antônio, Fabrício e Juliana, pela
colaboração na realização dos trabalhos experimentais e nas simulações.

Aos amigos da Faculdade de Engenharia Química, Aderjane, Adriene, Alaine,
Alcides, Andreia, Davi, Emilia, Fabiana, Fabiano, Fabio, Ione, Janaina, Líbia, Marcos
Roberto, Patrícia, Reimar, Raquel Melo, Ricardo Corrêa, Ricardo Pires, Sandra, pela amizade
mantida ao decorrer desta jornada.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Símbolos Gregos	vii
Subscritos	viii
Resumo	ix
Abstract	x
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Leito de Jorro	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Estudo Experimental	3
1.2.2 Estudo de Simulação por CFD	3
CAPÍTULO 2	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Tipos de Leito de Jorro Não Convencionais	4
2.2 Regiões Características do Leito de Jorro com Tubo <i>Draft</i>	5
2.3 Estudos de Fluidodinâmica em Leito de Jorro	7
2.4 A Técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD)	10
2.4.1 Fluidodinâmica Computacional em Sistemas Multifásicos	11
2.4.1.1 Modelagem Básica Empregada em Escoamentos Multifásicos	11
2.4.1.2 Modelagem Euler-Euler	12
2.5 A Técnica de Volumes Finitos	15
2.6 Geração de Malhas Computacionais de Discretização	16
2.6.1 Métodos de Malha Estruturada	16
2.6.2 Métodos de Malha Não-Estruturada	17
2.6.3 Métodos de Malha Híbridas	18
2.7 Simulação da Fluidodinâmica por CFD em Leito de Jorro	18
2.7.1 Verificação do Modelo Euleriano Granular Multifásico	19
2.7.1.1 Verificação da Metodologia utilizada na Modelagem CFD com Dados Experimentais de HE <i>et al.</i> (1994)	19

CAPÍTULO 3	23
MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 Material	23
3.1.1 Sementes de Soja	23
3.2 Medidas Experimentais da Fluidodinâmica em Leito de Jorro	23
3.2.1 Condições Operacionais	25
3.2.2 Descrição da Metodologia Adotada na Obtenção dos Dados Experimentais ...	26
3.3 Obtenção da Malha Adotada nas Simulações	26
3.4 Modelagem de Fluxos Multifásicos via CFD	28
3.4.1 Modelagem Euler-Euler	28
2.4.1.2 O Modelo Euleriano	28
3.4.2 A Escolha do Modelo Multifásico	29
3.5 Modelagem Fluidodinâmica em Leito de Jorro	29
3.5.1 Frações Volumétricas	29
3.5.2 Equações de Conservação	30
3.5.2.1 Equação da Continuidade	30
3.5.2.2 Equações de <i>Momentum</i> para a Fase Fluida	30
3.5.2.3 Equações de <i>Momentum</i> para a Fase Sólida	31
3.5.3 Coeficientes de Troca na Intefase	32
3.5.3.1 Coeficientes de Troca Fluido-Sólido	32
3.5.4 Pressão de Sólidos	35
3.5.5 Função Distribuição Radial	35
3.5.6 Tensão de Cisalhamento dos Sólidos	36
3.5.6.1 Viscosidade Colisional	36
3.5.6.2 Viscosidade Cinética	37
3.5.6.3 Viscosidade Bulk	37
3.5.6.4 Viscosidade Friccional	37
3.5.7 Temperatura Granular	38
3.5.8 Demais Métodos Utilizados nas Simulações	39
3.6 Metodologia para Obtenção das Curvas Características Simuladas	39

CAPÍTULO 4	41
RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Obtenção da Curva característica Experimental	41
4.1.1 Leito Fixo	41
4.1.2 Expansão	42
4.1.3 Jato Interno	42
4.1.4 Jorro Estabelecido	43
4.2 Influência do Modelo de Arraste	43
4.2.1 Curvas Características Experimental e Simulada	44
4.2.2 Perfis de Fração de Volume de Sólidos Simulados para cada Modelo	45
4.2.3 Perfis Axiais de Porosidade e Velocidade da Soja para cada Modelo	48
4.3 Influência da Inserção do Tubo <i>Draft</i>	52
4.3.1 Curvas Características Experimentais e Simuladas para as Configurações: Convencional (sem tubo) e Com Tubo <i>Draft</i>	52
4.3.2 Perfis Simulados de Fração de Volume de Sólidos para as Configurações: Convencional (sem tubo) e Com Tubo <i>Draft</i>	57
4.3.3 Perfis Axiais Simulados de Porosidade para as Configurações: Convencional e Com <i>Draft</i>	59
4.3.4 Perfis Axiais Simulados de Velocidade da Partícula Sem e Com Tubo <i>Draft</i> ..	62
4.3.5 Perfis Simulados de Fração de Volume de Velocidade do Ar para uma mesma Vazão de Fluido na Alimentação	64
CAPÍTULO 5	68
CONCLUSÕES	68
CAPÍTULO 6	71
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ANEXOS

Anexo 1 – Flutuações de Pressão e Espectros de Potência Experimentais para as Demais Configurações de Leito de Jorro com Tubo <i>Draft</i>	75
Anexo 2 - Resultados de Jorro Mínimo e Curvas Características Experimental e Simuladas para as Demais Alturas de Leito Estático	87
Anexo 3 - Perfis Fração de Volume de Sólidos para as Demais Configurações Estudadas	92
Anexo 4 - Perfis Axiais de Porosidade de Velocidade dos Sólidos Para as Demais Configurações de Estudadas	96

Lista de Figuras

Figura 2.1 O leito de jorro com tubo <i>draft</i> e suas regiões características	5
Figura 2.2 Geometria do leito de jorro, HE <i>et al.</i> (1994)	20
Figura 2.3 Distribuição de velocidade radial, resultados experimentais obtidos por HE <i>et al.</i> (1994)	21
Figura 2.4 Distribuição de velocidade radial, resultados simulados por DUARTE <i>et al.</i> (2005)	21
Figura 2.5 Distribuição radial de porosidade (região de jorro), dados experimentais obtidos por HE <i>et al.</i> (1994)	21
Figura 2.6 Distribuição radial de porosidade (região de jorro), resultados simulados por DUARTE <i>et al.</i> (2005)	21
Figura 3.1 Esquema da unidade experimental do leito de jorro	24
Figura 3.2.a Flutuação de Pressão experimental no jorro estabelecido. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$ e $Q=74,5\text{m}^3/\text{h}$	26
Figura 3.2.b Espectro de Potência experimental no jorro estabelecido. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$ e $Q=74,5\text{m}^3/\text{h}$	26
Figura 3.3 Malha híbrida adotada na simulação	27
Figura 3.4 Flutuação de Pressão simulada vs. tempo de simulação na condição de jorro estabelecido. ($He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$ e $Q=74,5\text{m}^3/\text{h}$)	40
Figura 4.1.a Flutuação de Pressão no leito fixo. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=15,7\text{m}^3/\text{h}$	41
Figura 4.1.b Espectros de Potência no leito fixo. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=15,7\text{m}^3/\text{h}$	41
Figura 4.1.c Flutuação de Pressão na expansão. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=31,2\text{m}^3/\text{h}$	42
Figura 4.1.d Espectros de Potência na expansão. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=31,2\text{m}^3/\text{h}$	42
Figura 4.1.e Flutuação de Pressão no jato interno. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=60,6\text{m}^3/\text{h}$	42
Figura 4.1.f Espectros de Potência no jato interno. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=60,6\text{m}^3/\text{h}$	42
Figura 4.1.g Flutuação de Pressão no jorro estável. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=74,6\text{m}^3/\text{h}$	43
Figura 4.1.h Espectros de Potência no jorro estável. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=74,6\text{m}^3/\text{h}$	43
Figura 4.2 Curvas características experimental e simulada para cada modelos de arraste	44
Figura 4.3 Fração de volume de sólidos simulados por GIDASPOW <i>et al.</i> (1992)	46
Figura 4.4 Fração de volume de sólidos simulados por SYAMLAL e O'BRIEN (1989)	46
Figura 4.5 Fração de volume de sólidos simulados por WEN e YU (1966)	47
Figura 4.6 Fração de volume de sólidos para os três modelos de arraste ($Q=74,6\text{m}^3/\text{h}$)	47
Figura 4.7 Perfis de porosidade na região de jorro por GIDASPOW <i>et al.</i> (1992)	49
Figura 4.8 Perfis de porosidade na região de jorro por SYAMLAL e O'BRIEN (1989)	49
Figura 4.9 Perfis de porosidade na região de jorro por WEN e YU (1966)	50
Figura 4.10 Perfis de velocidade da soja na região anular por GIDASPOW <i>et al.</i> (1992)	51
Figura 4.11 Perfis de velocidade da soja na região anular do SYAMLAL-O'BRIEN (1989)....	51

Figura 4.12 Perfis de velocidade da soja na região anular por WEN e YU (1966).....	52
Figura 4.13 Curvas características experimentais para três distâncias do <i>draft</i> à base (Hd) ..	53
Figura 4.14 Curvas características experimental e simulada para o leito de jorro sem <i>draft</i> ..	54
Figura 4.15 Curvas características experimental e simulada do leito com <i>draft</i> (Hd = 4cm)..	54
Figura 4.16 Curvas características experimental e simulada do leito com <i>draft</i> (Hd=5,5cm)..	55
Figura 4.17 Curvas características experimental e simulada do leito com <i>draft</i> (Hd = 7cm)..	55
Figura 4.18 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro convencional (Sem <i>Draft</i>).....	57
Figura 4.19 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com <i>draft</i> (Hd = 4cm)	58
Figura 4.20 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com <i>draft</i> (Hd = 5,5cm)	58
Figura 4.21 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com <i>draft</i> (Hd = 7cm)	59
Figura 4.22 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais do leito de jorro convencional. ($Q_{1,2JM}^{exp} = 136,5 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Sem <i>Draft</i>).....	60
Figura 4.23 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais ($Q_{1,2JM}^{exp}=59,5 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 4 cm)	60
Figura 4.24 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais $Q_{1,2JM}^{exp}=69,25 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 5,5cm).....	61
Figura 4.25 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais $Q_{1,2JM}^{exp}=82,22 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 7 cm)	61
Figura 4.26 Distribuição radial simulados de velocidade da soja para várias alturas axiais do leito de jorro convencional. ($Q_{1,2JM}^{exp} = 136,5 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Sem <i>Draft</i>)	62
Figura 4.27 Distribuição radial simulados de velocidade da soja para várias alturas axiais ($Q_{1,2JM}^{exp}=59,5 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 4 cm)	63
Figura 4.28 Distribuição radial simulados de velocidade da soja para várias alturas axiais ($Q_{1,2JM}^{exp}=69,25 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 5,5cm)	63
Figura 4.29 Distribuição radial simulados de velocidade da soja para várias alturas axiais ($Q_{1,2JM}^{exp}=82,22 \text{ m}^3/\text{h}$, He = 19 cm e Hd = 7 cm)	64
Figura 4.30 Perfis de fração de volume de sólidos a uma vazão de $74,5\text{m}^3/\text{h}$ e He=19cm ...	65
Figura 4.31 Distribuição radial simulados de velocidade do ar (Hd = 4 cm).....	65
Figura 4.32 Distribuição radial simulados de velocidade do ar (Hd = 5,5 cm)	66
Figura 4.33 Distribuição radial simulados de velocidade do ar (Hd = 7 cm)	66
Figura A.1.1.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=16cm, Hd=4cm. Q=6,1 m^3/h	76
Figura A.1.1.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=16cm, Hd=4cm. Q=6,1 m^3/h	76
Figura A.1.1.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=16cm, Hd=4cm. Q=23,8 m^3/h	76
Figura A.1.1.d. Espectros de Potência na expansão. He=16cm, Hd=4cm. Q=23,8 m^3/h	76
Figura A.1.1.e. Flutuação de Pressão no jato interno. He=16cm, Hd=4cm. Q=30,7 m^3/h	76
Figura A.1.1.f. Espectros de Potência no jato interno. He=16cm, Hd=4cm. Q=30,7 m^3/h	76
Figura A.1.1.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. He=16cm, Hd=4cm. Q=40,6 m^3/h	77
Figura A.1.1.h. Espectros de Potência no jorro estável. He=16cm, Hd=4cm. Q=40,6 m^3/h ...	77

Figura A.1.2.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=9,1m ³ /h	77
Figura A.1.2.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=9,1m ³ /h	77
Figura A.1.2.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=26m ³ /h	77
Figura A.1.2.d. Espectros de Potência na expansão. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=26m ³ /h	77
Figura A.1.2.e. Flutuação de Pressão no jato interno. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=43,5m ³ /h ...	78
Figura A.1.2.f. Espectros de Potência no jato interno. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=43,5m ³ /h ..	78
Figura A.1.2.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=50,9m ³ /h ..	78
Figura A.1.2.h. Espectros de Potência no jorro estável. He=16cm, Hd=5,5cm. Q=50,9m ³ /h..	78
Figura A.1.3.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=16cm, Hd=7cm. Q=10,7m ³ /h	78
Figura A.1.3.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=16cm, Hd=7cm. Q=10,7m ³ /h	78
Figura A.1.3.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=16cm, Hd=7cm. Q=27,2m ³ /h	79
Figura A.1.3.d. Espectros de Potência na expansão. He=16cm, Hd=7cm. Q=27,2m ³ /h	79
Figura A.1.3.e. Flutuação de Pressão no jato interno. He=16cm, Hd=7cm. Q=54,9m ³ /h	79
Figura A.1.3.f. Espectros de Potência no jato interno. He=16cm, Hd=7cm. Q=54,9m ³ /h	79
Figura A.1.3.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. He=16cm, Hd=7cm. Q=63,9m ³ /h	79
Figura A.1.3.h. Espectros de Potência no jorro estável. He=16cm, Hd=7cm. Q=63,9m ³ /h ...	79
Figura A.1.4.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=19cm, Hd=4cm. Q=7,6m ³ /h	80
Figura A.1.4.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=19cm, Hd=4cm. Q=7,6m ³ /h	80
Figura A.1.4.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=19cm, Hd=4cm. Q=31,2m ³ /h	80
Figura A.1.4.d. Espectros de Potência na expansão. He=19cm, Hd=4cm. Q=31,2m ³ /h	80
Figura A.1.4.e. Flutuação de Pressão no jato interno. He=19cm, Hd=4cm. Q=46,2m ³ /h	80
Figura A.1.4.f. Espectros de Potência no jato interno. He=19cm, Hd=4cm. Q=46,2m ³ /h	80
Figura A.1.4.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. He=19cm, Hd=4cm. Q=55,8m ³ /h	81
Figura A.1.4.h. Espectros de Potência no jorro estável. He=19cm, Hd=4cm. Q=55,8m ³ /h ...	81
Figura A.1.5.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=12,7m ³ /h	81
Figura A.1.5.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=12,7m ³ /h	81
Figura A.1.5.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=32,2m ³ /h	81
Figura A.1.5.d. Espectros de Potência na expansão. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=32,2m ³ /h	81
Figura A.1.5.e. Flutuação de Pressão no jato interno. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=53,3m ³ /h ...	82
Figura A.1.5.f. Espectros de Potência no jato interno. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=53,3m ³ /h ..	82
Figura A.1.5.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=63,9m ³ /h..	82
Figura A.1.5.h. Espectros de Potência no jorro estável. He=19cm, Hd=5,5cm. Q=63,9m ³ /h..	82
Figura A.1.6.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. He=22cm, Hd=4cm. Q=14,7m ³ /h	83
Figura A.1.6.b. Espectros de Potência no leito fixo. He=22cm, Hd=4cm. Q=14,7m ³ /h	83
Figura A.1.6.c. Flutuação de Pressão na expansão. He=22cm, Hd=4cm. Q=29,3m ³ /h	83

Figura A.1.6.d. Espectros de Potência na expansão. $He=22\text{cm}$, $Hd=4\text{cm}$. $Q=29,3\text{m}^3/\text{h}$	83
Figura A.1.6.e. Flutuação de Pressão no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=4\text{cm}$. $Q=50,1\text{m}^3/\text{h}$	83
Figura A.1.6.f. Espectros de Potência no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=4\text{cm}$. $Q=50,1\text{m}^3/\text{h}$	83
Figura A.1.6.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=4\text{cm}$. $Q=62,4\text{m}^3/\text{h}$	84
Figura A.1.6.h. Espectros de Potência no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=4\text{cm}$. $Q=62,4\text{m}^3/\text{h}$...	84
Figura A.1.7.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=15,2\text{m}^3/\text{h}$	84
Figura A.1.7.b. Espectros de Potência no leito fixo. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=15,2\text{m}^3/\text{h}$	84
Figura A.1.7.c. Flutuação de Pressão na expansão. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=32,2\text{m}^3/\text{h}$	84
Figura A.1.7.d. Espectros de Potência na expansão. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=32,2\text{m}^3/\text{h}$	84
Figura A.1.7.e. Flutuação de Pressão no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=57,2\text{m}^3/\text{h}$...	85
Figura A.1.7.f. Espectros de Potência no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=57,2\text{m}^3/\text{h}$..	85
Figura A.1.7.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=74,5\text{m}^3/\text{h}$..	85
Figura A.1.7.h. Espectros de Potência no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$. $Q=74,5\text{m}^3/\text{h}$..85	
Figura A.1.8.a. Flutuação de Pressão no leito fixo. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=19,3\text{m}^3/\text{h}$	85
Figura A.1.8.b. Espectros de Potência no leito fixo. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=19,3\text{m}^3/\text{h}$	85
Figura A.1.8.c. Flutuação de Pressão na expansão. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=34,6\text{m}^3/\text{h}$	86
Figura A.1.8.d. Espectros de Potência na expansão. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=34,6\text{m}^3/\text{h}$	86
Figura A.1.8.e. Flutuação de Pressão no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=74,7\text{m}^3/\text{h}$	86
Figura A.1.8.f. Espectros de Potência no jato interno. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=74,7\text{m}^3/\text{h}$	86
Figura A.1.8.g. Flutuação de Pressão no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=90,5\text{m}^3/\text{h}$	86
Figura A.1.8.h. Espectros de Potência no jorro estável. $He=22\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$. $Q=90,5\text{m}^3/\text{h}$...	86
Figura A2.1 Curvas características experimental e simulada ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	89
Figura A2.2 Curvas características experimental e simulada ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	89
Figura A2.3 Curvas características experimental e simulada ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	90
Figura A2.4 Curvas características experimental e simulada ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	90
Figura A2.5 Curvas características experimental e simulada ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	91
Figura A2.6 Curvas características experimental e simulada ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	91
Figura A3.1 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	93
Figura A3.2 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$)....	93
Figura A3.3 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	94
Figura A3.4 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	94
Figura A3.5 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$)....	95
Figura A3.6 Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	95
Figura A4.1 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=43,64 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	97

Figura A4.2 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=43,64 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	97
Figura A4.3 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=55,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	98
Figura A4.4 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=55,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	98
Figura A4.5 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=69,75 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	99
Figura A4.6 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=69,75 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	99
Figura A4.7 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=65,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	100
Figura A4.8 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=65,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).....	100
Figura A4.9 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=81,3 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	101
Figura A4.10 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=81,3 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).....	101
Figura A4.11 Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=96,63 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	102
Figura A4.12 Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM}^{exp}=96,63 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).....	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Relações constitutivas	14
Tabela 2.2 Condições experimentais usadas por HE <i>et al.</i> (1994)	20
Tabela 3.1 Propriedades físicas das sementes de soja da variedade VENCEDORA	23
Tabela 3.2 Dimensões do leito de jorro	25
Tabela 4.1 Valores de vazão de jorro mínimo experimental e simulada	44
Tabela 4.2 Queda de pressão experimental e simulada no jorro mínimo	45
Tabela 4.3 Valores de vazão de jorro mínimo experimental e simulada para $He = 19\text{cm}$	56
Tabela 4.4 Queda de pressão experimental e simulada no jorro mínimo para $He = 19\text{cm}$...	56
Tabela A.2.1 Valores de Vazão de Jorro Mínimo Experimental e Simulada ($He = 16\text{cm}$) ...	88
Tabela A.2.2 Queda de Pressão Experimental e Simulada no Jorro Mínimo ($He = 16\text{cm}$) ...	88
Tabela A.2.3 Valores de Vazão de Jorro Mínimo Experimental e Simulada ($He = 22\text{cm}$) ...	88
Tabela A.2.4 Queda de Pressão Experimental e Simulada no Jorro Mínimo ($He = 22\text{cm}$) ...	88

Lista de Símbolos

A	Parâmetro da Equação (3.14)
b	Taxa de fluxo
B	Parâmetro da Equação (3.14)
C_D	Coeficiente de arraste
\bar{d}_p	Diâmetro médio da esfera de igual volume que a partícula, $M^0 L^1 T^0$
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
fa	Força de Arraste, $M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}	Força externa do corpo, $M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_{lift}	Força de ascensão, $M^1 L^1 T^{-2}$
\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
Hd	Distância do tubo <i>Draft</i> a base do leito, $M^0 L^1 T^0$
He	Altura do leito estático, $M^0 L^1 T^0$
K_{fs}	Coeficiente de troca de momento na interface das fase fluida (<i>f</i>) e sólida (<i>s</i>)
L	Comprimento, $M^0 L^1 T^0$
\dot{m}	Taxa de transferência de massa
p	Pressão, $M^1 L^{-1} T^{-2}$
p_s	Pressão de sólido
\vec{q}	Fluxo de calor
Q	Vazão volumétrica, $M^0 L^3 T^{-1}$
Q_g	Vazão mássica de ar, $M^1 L^0 T^{-1}$

Q_{JM}	Vazão mássica de ar na condição de Jorro Mínimo, $M^1 L^0 T^{-1}$
ΔP	Queda de Pressão, $M^1 L^{-1} T^{-2}$
ΔP_{JM}	Queda de Pressão na condição de Jorro Mínimo, $M^1 L^{-1} T^{-2}$
R	Raio, $M^0 L^1 T^0$
R_e	Número de Reynolds
R_{es}	Número de Reynolds relativo (Adota-se Velocidade relativa em seu cálculo)
sg	Distância entre os grãos,
t	Tempo, $M^0 L^0 T^1$
ts	Tempo de relaxação da partícula, $M^0 L^0 T^1$
\vec{v}_q	Velocidade da fase genérica q , $M^0 L^1 T^{-1}$
V	Volume, $M^0 L^3 T^0$

Símbolos Gregos

α_q	Fração volumétrica da fase genérica q , $M^0 L^0 T^1$
α_c	Fração volumétrica da fase continua, $M^0 L^0 T^1$
α_d	Fração volumétrica da fase dispersa, $M^0 L^0 T^1$
ϵ	Porosidade
ϕ	Esfericidade
γ_{d}	Energia de dissipação devido à colisão
λ	Viscosidade bulk, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
μ	Viscosidade da fase fluida, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
μ_s	Viscosidade de cisalhamento, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
$\mu_{s,col}$	Viscosidade devida a colisão das partículas, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
$\mu_{s,fr}$	Viscosidade devido ao atrito, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
$\mu_{s,kin}$	Viscosidade cinética, $M^1 L^{-1} T^{-1}$
θ	Ângulo da parte cônica
Θ_s	Temperatura granular
ρ	Densidade da fase fluida, $M^1 L^{-3} T^0$
ρ_s	Densidade da partícula, $M^1 L^{-3} T^0$
τ_q	Tensor tensão de sólidos;

Subscritos

f Fase (fluida) do modelo multifásico

JM Condição de Jorro Mínimo

S Fase (sólida) do modelo multifásico

RESUMO

O leito de jorro tem sido utilizado em diversos processos como secagem, granulação, polimerização catalítica, tratamento de resíduos e no revestimento de materiais. A justificativa desta aplicação é atribuída ao excelente contato fluido-partícula e às características de circulação dos sólidos. Apesar de sua extensa aplicação este equipamento possui algumas limitações de ampliação de escala (“*scale-up*”), sendo necessário um melhor entendimento a cerca de seu comportamento fluidodinâmico. Assim, o conhecimento de escoamento do fluido e partículas no interior do leito de jorro é de grande interesse para o projeto deste equipamento, embora a quantificação da movimentação dos sólidos seja de difícil medida, mesmo em regiões de menor densidade como na região de jorro. Uma outra limitação apresentada pela configuração convencional do leito de jorro é o “curto-circuito” das partículas, ou seja, o retorno das partículas que estão na interface jorro-anular para a região de jorro antes de percorrer toda a região anular. Este curto circuito provoca uma maior distribuição de tempo de residência das partículas, tendo como consequência um produto heterogêneo. Uma alternativa para contornar esta limitação é a introdução de um tubo central (*draft*), que além de impedir este problema, pode alterar significativamente a fluidodinâmica do leito, trazendo outras consequências relativas ao contato fluido-partícula. Na modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) de fluxos bifásicos gás-sólido a força de arraste é uma das principais forças que atua nas partículas, tendo importante papel no acoplamento entre as duas fases. Além disto, no leito de jorro, a fração de volume de sólidos pode variar de praticamente zero até o valor máximo do limite de empacotamento, levando a um comportamento muito mais complexo das forças de arraste do que em sistemas fluidizados convencionais. Assim, é necessário um cuidado especial na escolha do modelo de arraste que melhor descreve o fluxo multifásico estudado. Dentre os modelos de arraste analisados no presente trabalho, o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) foi o que apresentou as melhores concordâncias com dados experimentais na condição de jorro mínimo. Neste trabalho, os perfis fluidodinâmicos característicos do leito de jorro com e sem tubo *draft* foram simulados pela técnica de CFD, por meio de um Modelo Granular Euleriano Multifásico, utilizando sementes de soja como material particulado. As curvas características simuladas de queda de pressão em função da vazão de ar, para as diferentes configurações do leito de jorro (convencional e com tubo *draft* situado à diferentes distâncias da base), foram comparadas com os dados experimentais apresentando boa concordância. Além disto, foram obtidos perfis simulados de porosidade na região de jorro e de velocidade da partícula na região anular para vazão de ar 20% superior a condição de jorro mínimo experimental de cada configuração ($Q=1,2Q_{JM}^{exp}$). Finalmente foi feita uma análise da influência da distância do *draft* à base (H_d) sobre os perfis simulados de velocidade do ar nas regiões de jorro e anular para uma mesma vazão de alimentação.

Palavras-chave: Leito de Jorro, Tubo *Draft*, Fluidodinâmica Computacional (CFD).

ABSTRACT

The spouted bed has been used in several processes as drying, granulation, catalytic polymerization, residues treatment and materials coating. This application is due to the excellent fluid-particle contact and to the characteristics of the solids circulation. In spite of its extensive application, the spouted bed has some scale-up limitations, so it's necessary a better understanding about its fluid dynamic behavior. So, the knowledge of fluid and particles flows inside the spouted bed is of great interest for this equipment project, although the quantification of the solids motion is difficult to measure, even in regions of smaller density as in the spout. Another limitation presented by the conventional configuration of the spouted bed is the "short-circuit" of particles, in other words, the return of the particles that are in the spout-annulus interface for the spout before traveling the whole annulus area. This short-circuit provokes a larger distribution of particles residence time, resulting in a heterogeneous product. An alternative to outline this limitation is to introduce a central tube (*draft*) that besides preventing this problem can also significantly alter the fluid dynamic of the bed, bringing other relative consequences to the fluid-particle contact. In the Computational Fluid Dynamic (CFD) modeling of two-phase gas-solid flows the drag force is one of the principal forces that acts in the particles, and has an important paper in the coupling among the two phases. Besides, in the spouted bed, the solids volume fraction can vary of practically zero to the maximum value of the packing limit, taking to a much more compound behavior of drag force than in conventional fluidized systems. So, it's necessary a special care in the choice of the drag model that best describes the multiphase flows studied. Among the drag models analyzed in the present work, the model of GIDASPOW *et al.* (1992) shows the best agreements with experimental data in the minimum spout condition. In this work, the fluid dynamics characteristic profiles of the spouted bed with and without *draft* tube were simulated by the CFD technique, through a Multiphase Granular Eulerian Model, using soybean seeds as particulate material. The characteristic curves of pressure drop in function of the air flow simulated, for the different configurations of the spouted bed (conventional and with tube *draft* located at different distances of the base), were compared with the experimental data presenting good agreement. Besides, were obtained simulated profiles of void in the spout area and of particle velocity in the annulus for air flows 20% higher than experimental minimum spout condition of each configuration ($Q=1,2Q_{JM}^{exp}$). Finally was made an analysis of the influence of the distance of the *draft* to the base (H_d) on the air velocity simulated profiles in the spout areas and to annulus for a same feeding air flow.

Key-Words: Spouted Bed, *Draft* Tube, Computational Fluid Dynamic (CFD).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Leito de Jorro

O leito de jorro surgiu no Canadá com MARTHUR e GISHLER (1955) como uma alternativa para o manuseio de partículas de maior diâmetro em leitos fluidizados. Alguns autores o consideraram durante certo tempo como uma versão modificada do leito fluidizado. Porém, esta visão já não é muito adequada, visto que no seu desenvolvimento, o leito de jorro tem exibido características específicas que o faz capaz de executar certas operações de ciclo úteis em partículas sólidas que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido a seu movimento de partículas comparativamente aleatório (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O fluxo gás-sólido no interior de um leito de jorro pode ser dividido em três regiões de escoamento: a região de jorro no centro do leito, onde a velocidade do ar de jorro e de ascensão das partículas é alta e a concentração de partículas é baixa; a região da fonte, onde as partículas sobem até uma altura máxima, e depois sofrem uma desaceleração caindo na forma de chuva sobre a superfície superior da região anular; e a região anular entre a região de jorro e a parede do leito, onde a concentração de partículas é alta e elas se movem lentamente para baixo em direção à base do leito, completando o movimento cíclico das partículas.

Por apresentar características de boa agitação dos sólidos e de um efetivo contato gás-sólido, além do baixo investimento inicial e custo operacional, o leito de jorro tem sido estudado em diversas aplicações como secagem e revestimento de partículas, granulação, dentre outras. Apesar de sua extensa aplicação este equipamento possui algumas limitações, sendo necessário um melhor entendimento acerca de seu comportamento fluidodinâmico.

Uma das limitações apresentadas pela configuração convencional do leito de jorro é o “curto-circuito” das partículas, ou seja, o retorno de algumas partículas que estão na interface jorro-anular para a região de jorro antes de completarem o ciclo. Este curto circuito provoca uma maior distribuição de tempo de residência das partículas, tendo como consequência um produto heterogêneo. Alguns autores, como CLAFIN e FANE (1982), utilizaram um tubo central (*tubo draft*) separando as duas regiões, visando impedir o “curto circuito” de partículas. A introdução deste tubo, além de impedir este problema, pode alterar

significativamente a fluidodinâmica do leito de jorro, trazendo outras consequências relativas ao contato fluido-partícula.

Para o projeto de sistemas de leito de jorro, é necessário conhecer os aspectos fluidodinâmicos de jorro. Isto inclui o conhecimento dos escoamentos de fluido e partícula, estrutura do leito (forma do leito e distribuição de porosidade), estabilidade de jorro, e máxima altura de leito para jorro estável. Além disto, o conhecimento da vazão e queda de pressão na condição de mínimo jorro é essencial para um projeto adequado do leito de jorro.

A previsão do comportamento fluidodinâmico por meio de simulações numéricas, desde que validadas através da comparação com dados experimentais, pode ser uma importante ferramenta na identificação dos regimes de escoamento em leito de jorro. Este estudo pode ser desenvolvido por meio da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) através da adoção de um modelo multifásico que trate as fases como interpenetradamente contínuas e considere o balanço de *momentum* e massa para as fases envolvidas (DUARTE, 2006).

Na modelagem fluidodinâmica computacional (CFD) de escoamentos bifásicos gás-sólido a força de arraste é uma das principais forças que atuam nas partículas, tendo um importante papel no acoplamento entre as duas fases. Além disto, em leito de jorro, a fração de volume de sólidos pode variar de praticamente zero até o valor do limite de empacotamento, levando a um comportamento muito complexo das forças de arraste, que pode variar de acordo com o regime de escoamento no interior do leito. Assim, é necessário um cuidado especial na escolha do modelo de arraste que melhor descreve o escoamento multifásico estudado.

DUARTE (2006), em trabalho anterior (tese de doutorado) realizado na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) mostrou que um estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro convencional, pela técnica de CFD, permite obter a solução de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas que expressam a conservação de massa e quantidade de movimento. Isto torna possível descrever a distribuição de velocidade e porosidade das partículas e do fluido e queda de pressão desde o instante onde se inicia o movimento até o momento em que este se estabiliza. Neste sentido, pretende-se adotar a técnica de CFD para prever as diferenças fluidodinâmicas decorrentes da introdução do tubo *draft* na configuração convencional do leito de jorro.

1.2. Objetivos

Tendo em vista os aspectos mencionados anteriormente, o objetivo desta dissertação é realizar um estudo de fluidodinâmica do leito de jorro, por meio da técnica de CFD, buscando uma verificação do efeito da inserção do tubo *draft* nas características do escoamento sólido-fluido deste leito. Para isto, serão realizadas verificações da metodologia utilizada nas simulações, por meio da comparação com dados experimentais. Sendo assim, o desenvolvimento desta dissertação contempla duas etapas, sendo a primeira referente ao estudo experimental e a segunda referente aos estudos de simulação pela técnica de CFD.

1.2.1. Estudo Experimental

Nesta primeira etapa obtiveram-se os dados experimentais de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro (curva característica do leito), bem como, a condição de mínimo jorro experimental para as diferentes configurações estudadas. Estes experimentos foram realizados no Laboratório da Unidade Avançada de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU).

1.2.2. Estudo de Simulação por CFD

Esta segunda etapa contempla os estudos de simulação, por meio da técnica de CFD, utilizando o software *FLUENT® 6.1-18*. As etapas que compõem o estudo de CFD foram:

1. Comparar alguns modelos de arraste conhecidos na literatura na modelagem CFD de um leito de jorro com tubo *draft*;
2. Identificar a condição de jorro mínimo e obter as curvas características simuladas de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro;
3. Verificar a influência da inserção do tubo *draft*, bem como, avaliar o efeito da distância do tubo *draft* à base (H_d), sobre os perfis simulados de fração de volume de sólidos, perfis de distribuição radial e axial da porosidade na região de jorro, da velocidade da partícula na região anular, e de velocidade do fluido nas duas regiões.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de leito de jorro foi desenvolvido no Canadá por MATHUR e GISHLER (1955), quando testava um leito fluidizado com maior capacidade para secagem de trigo. Alguns autores consideraram o leito de jorro durante muito tempo como uma versão modificada do leito fluidizado, isto em função da pobre fluidização encontrada nesse tipo de leito quando em contato com partículas maiores. Porém esta consideração já não é muito adequada, visto que o leito de jorro exibe características particulares que o faz capaz de executar certas operações de ciclo úteis em partículas sólidas, que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido ao movimento comparativamente aleatório das partículas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Dentre as vantagens no uso do leito de jorro destacam-se a boa agitação dos sólidos e um efetivo contato gás-sólido, além do baixo investimento inicial e custo operacional. Por apresentar estas características o leito de jorro tem sido estudado em diversas aplicações como secagem e revestimento de partículas (FREIRE e SARTORI, 1992).

Apesar de seu crescente interesse, o leito de jorro apresenta algumas limitações na sua aplicação na forma convencional, citadas por DUTRA, 1984:

- a) dificuldades na ampliação de escala (*scale-up*);
- b) elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
- c) existência de uma altura máxima de leito que limita a carga do equipamento;
- d) grande faixa de tempo de residência das partículas;

2.1. Tipos de Leito de Jorro Não Convencionais

Encontra-se na literatura diversas alterações da configuração convencional do leito de jorro, dentre as quais se destacam:

- a) Leito de jorro cônicos: Constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a maior carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, onde o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônicos.
- b) Leito de jorro com tubo “draft”: Nesta variação há a inserção de um tubo concêntrico à parte cilíndrica do leito. Com a utilização desse artifício, consegue-se a melhora do

comportamento fluidodinâmico, com o direcionamento do ar na região de jorro central, o que possibilita uma redução na queda de pressão para jorro já estabelecido. Sua principal vantagem é a menor distribuição de tempo de residência das partículas, bem como, a homogeneização da circulação de partículas. Como desvantagens, destacamos o comprometimento da permeação do ar na região anular e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa nessa região, o que pode acarretar prejuízo em operações de secagem e revestimento. Para estas situações utiliza-se um *draft* poroso, que contorna o problema da redução das taxas de transferências de calor e massa, e mantém uma homogeneização na circulação das partículas.

- c) Leito de jorro-aerado: A porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, promovendo um aumento da porosidade nesta região, melhorando com isso as taxas de transferência de calor e massa.
- d) Leito de seção retangular: Leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco de pirâmide, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis de processo de recobrimento.
- e) Leito vibro-jorrado: A movimentação das partículas é auxiliada pela agitação oriunda de um sistema de vibração mecânica localizado na base do leito.

2.2. Regiões Características do Leito de Jorro com Tubo *Draft*

A Figura 2.1 apresenta um esquema do leito de jorro com tubo *draft* e suas regiões características.

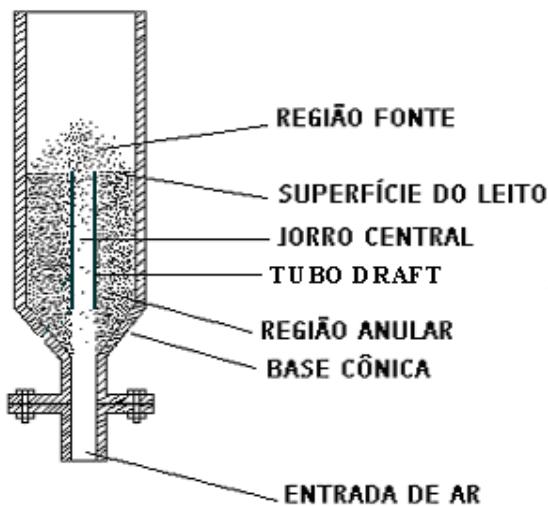


Figura 2.1 - O leito de jorro com tubo *draft* e suas regiões características.

- a) JORRO CENTRAL: Região de maior porosidade no leito onde ocorre o transporte pneumático das partículas com movimento concorrente gás e partícula;
- b) REGIÃO DE FONTE: Região acima do leito, onde as partículas advindas do jorro central desaceleram caindo na região anular. Para colunas cilíndricas, a altura da fonte aumenta com o incremento da velocidade superficial do gás, com a diminuição das dimensões do orifício de entrada de ar e com a diminuição do diâmetro das partículas;
- c) REGIÃO ANULAR: Nesta região as partículas que caem da região de fonte deslizam, em parte, até a base do leito num movimento contracorrente;
- d) SUPERFÍCIE DO LEITO: Cume do leito ao qual irá aflorar a região fonte depois de estabelecido o jorro;
- e) INTERFACE JORRO – ANULAR: Fronteira imaginária entre a região anular e o jorro central. Nessa região ocorrem alguns problemas como os “curtos-circuitos”, que nada mais são do que a migração prematura dos sólidos da região anular para o jorro central, diminuindo com isso o tempo de residência da partícula na região anular, afetando a homogeneidade do processo. Vale lembrar que o circuito ideal a ser percorrido pelo sólido é o arraste ascendente da partícula da base do leito até a região de fonte, pelo jorro central, para a seguir descer em contra-corrente ao escoamento de gás na região anular até a base da coluna onde irá retornar ao jorro central, fechando o ciclo. A inserção de um TUBO *DRAFT* separando estas duas regiões proporciona este ciclo ideal de movimentação de sólidos no leito.
- f) BASE CÔNICA: A base cônea de um leito de jorro favorece o movimento circulatório das partículas, além de diminuir as regiões conhecidas como “zonas mortas” na base da coluna. O ângulo da base cônea é um parâmetro importante a ser determinado. Os ângulos menores facilitam o escoamento de sólidos da região anular para a região de jorro. Por outro lado, se o ângulo for grande (cone muito fechado) o jorro fica instável já que o leito inteiro tende a ser suspenso pelo gás (DUTRA, 1984);
- g) ENTRADA DE AR: O ar é injetado em um leito de jorro por um orifício de entrada localizado na parte central da base da coluna. DUTRA (1984) apresenta como ideal a relação entre o diâmetro da parte cilíndrica da coluna e o diâmetro do orifício de entrada de ar igual a 6 (seis).

2.3. Estudos sobre Fluidodinâmica em Leito de Jorro

O conhecimento das características do escoamento de sólidos em um leito de jorro é de grande interesse para o seu projeto e aumento de escala (*scale-up*). Em escoamentos multifásicos gás-sólido, a observação experimental do movimento das partículas é difícil devido à grande quantidade das mesmas. A inserção de algumas sondas permite a medição do perfil fluidodinâmico das partículas e do gás, mas elas podem afetar o escoamento que é medido instantaneamente, por se tratar de uma técnica intrusiva. Uma outra 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 a de um leito fixo. A seguir são apresentados alguns estudos de fluidodinâmica em leitos de jorro.

YOKOGAWA e MEISEN (1970), mostraram dados detalhados de velocidades de partículas, em um leito de jorro semi-cilíndrico, usando uma câmera de alta velocidade. No entanto, 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 de velocidade dos sólidos não é parabólico conforme afirmaram alguns 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 por outro lado a velocidade aumenta com o decréscimo da altura na região côncava (DUARTE, 2006).

SUCIU e PATRASCU (1977) obtiveram dados em escala de laboratório e correlações concernentes à distribuição de escoamentos de ar e partículas nas regiões anular e de jorro, fração de partículas no jorro, e tempo de residência das partículas em função das características do leito. O movimento axial e radial das partículas foi examinado e suas velocidades foram medidas através da técnica de fotografias de alta velocidade. Esses autores também desenvolveram uma correlação de velocidade de ar no jorro em função da altura do leito, partindo de uma extensão da equação de ERGUN (1952).

BENKRID e CARAM (1989) usaram sondas de 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 superfície do leito da região anular. ROY *et al.* (1994) mediram a velocidade de partículas em um leito de jorro usando traçadores de

trajetória de partícula. Neste trabalho os autores realizaram experimentos de 3,5 horas, através dos quais, foram obtidos resultados que indicaram que os sólidos na região anular se movem como 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 é caracterizada por um ponto que fica localizado a uma pequena distância da alimentação de ar (DUARTE, 2006).

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 jorronular, 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 (DUARTE, 2006).

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 da fluidização. Porém, uma vez estabelecido o regime de fluidização os resultados obtidos para 2D e 3D foram muitos próximos exceto nas regiões próximas aos cantos do leito. Os autores concluíram também que o efeito do coeficiente de fricção é mais evidenciado quando se trabalha com tubo “*draft*”. Em um trabalho posterior, 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 (DUARTE, 2006).

CASSANELLO *et al.* (1999), estudaram a dinâmica de sólidos através de trajetórias experimentais de uma partícula isolada em leito de jorro por meio de uma técnica de acompanhamento das partículas radioativas. Os resultados mostraram a existência de um tempo de ciclo periódico das partículas no seu caminho no interior do leito, sendo a dinâmica dos sólidos fortemente relacionada com a velocidade do gás. OLAZAR *et al.* (2001), estudaram o efeito das condições operacionais na velocidade de sólidos nas regiões de jorro,

fonte e região anular de um leito de jorro cônico. 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. Os autores tiveram vários outros trabalhos publicados, apresentando uma importante contribuição no estudo de perfil de queda de pressão, velocidade, tempo de residência dentre outras propriedades do fluido e partícula para região cônica do leito de jorro (DUARTE, 2006).

LADEIRA e PASSOS (2002) realizaram um estudo experimental e de simulação utilizando analogias com a teoria de mecânica dos solos, 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 dos dados, comprovando a abrangência do modelo empírico 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 (DUARTE, 2006).

ISHIKURA *et al.* (2003), estudaram a fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo *draft* (tubo interno maciço e poroso) contendo uma pequena quantidade de partícula finas. Informações como altura da fonte, diâmetro do jorro, taxa de recirculação das partículas foram analisadas e comparadas para diferentes configurações. Os autores constataram que a velocidade de mínimo jorro decresce com acréscimo da fração mássica de partículas finas, e também decresce com a diminuição da altura entre o fundo do *draft* e a base do leito e com o decréscimo do diâmetro do tubo *draft* poroso. A velocidade de jorro mínimo para o tubo *draft* poroso é maior que para o tubo *draft* não-poroso. Os autores verificaram também que a taxa de circulação de sólidos aumenta monotonicamente com acréscimo da velocidade do gás e com aumento da distância entre o *draft* e a base e incremento do diâmetro dos poros do *draft*.

ZHONG *et al.* (2006, a) realizaram investigações experimentais nas características fluidodinâmicas em um leito de jorro-fluidizado bidimensional utilizando seis tipos de partículas do grupo D de Geldart. Os resultados mostraram que a queda de pressão total do leito se parece com a de um leito de jorro característico quando se incrementa a velocidade de ar de jorro e mantêm a velocidade de gás de fluidização constante, enquanto se parece com a de um leito fluidizado característico quando se incrementa a velocidade do gás de fluidização e mantêm a velocidade do ar de jorro constante. A queda de pressão máxima de jorro

requerida para iniciar o jorro aumenta com a altura de leito estático e com a densidade da partícula, mas diminui com o diâmetro de partícula, com a largura do bocal de jorro e com a velocidade de gás de fluidização. As velocidades de mínimo jorro e de mínimo jorro-fluidizado ambas aumentam com a altura de leito estático, diâmetro da partícula, largura do bocal de jorro. A velocidade de mínimo jorro-fluidizado aumenta enquanto que a velocidade de jorro mínimo diminui com a velocidade do gás de fluidização.

LOURENÇO (2006), em trabalho anterior (dissertação de mestrado) realizado na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) realizou um estudo sobre identificação e monitoramento de regimes em um leito de jorro convencional. Neste trabalho, obtiveram-se dados de flutuação de pressão e espectros de potência em um leito de jorro convencional para diferentes alturas de leito estático (He) e diferentes partículas (sementes de soja e algodão). Verificou-se que as diferenças entre os gráficos de flutuação de pressão em função do tempo foram pequenas. Por outro lado, os espectros de potência extraídos em cada etapa dos experimentos mostraram diferenças significativas merecendo atenção especial para cada tipo de regime. Essas observações foram condizentes com alguns trabalhos anteriores, como, por exemplo, TARANTO (1996).

Recentemente alguns autores têm realizado diversos estudos sobre escoamento de sólidos em leito de jorro através de simulação pela técnica de fluidodinâmica computacional (CFD). Através desta técnica é possível descrever perfis de porosidade e de velocidade dos sólidos, em diferentes regiões do leito, onde a inserção de sondas poderia alterar significativamente a fluidodinâmica do leito. Essa técnica de CFD é descrita mais detalhadamente no tópico a seguir.

2.4. A Técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Com o advento dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que atualmente é conhecida como Dinâmica de Fluido Computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A simulação de escoamentos em torno de perfis aerodinâmicos, a simulação de escoamento com reações químicas, ou, ainda, a simulações de sistemas multifásicos, são algumas das importantes aplicações da análise numérica computacional. O avanço tecnológico do setor computacional abriu novas possibilidades para a abordagem dos problemas de engenharia, 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 mais complexos (DUARTE, 2006).

A indústria aerodinâmica foi a principal impulsionadora dos estudos e do avanço da fluidodinâmica computacional. Por exemplo, a solução do escoamento turbulento supersônico sobre um aerofólio que na década de 60 consumiria um tempo de computação de aproximadamente 30 anos a um custo de 10 milhões de dólares, usando computadores do tipo IBM 704, nos dias de hoje, utilizando os computadores atuais, não iriam requerer mais do que minutos de CPU com custo de centenas de dólares (MALISKA, 1995 *apud* DUARTE, 2006).

Visto o avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores, um grande avanço tem sido obtido na geração de “softwares” de CFD comerciais. Os códigos CFD comerciais são mais que simples resolvedores 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. Uma das principais vantagens refere-se à rápida geração de resultados para sistemas simples (geometria simples, uma única fase e 2D). 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. Em casos mais sofisticados a malha pode acompanhar possíveis deformações do volume de controle durante a simulação (DUARTE, 2006).

A maior parte dos códigos CFD comerciais usam a metodologia de volumes finitos, na qual equações governantes são discretizadas na forma de um volume integral. 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. A Modelagem CFD é uma importante ferramenta capaz de fornecer detalhes sobre fenômenos de turbulência e acerca do escoamento no interior de leitos. Logo, esta ferramenta tem sido cada vez mais adotada no estudo de perfis de escoamentos bifásicos gás-partícula. No entanto, a aplicação a sistemas mais densos, como o leito de jorro, ainda tem sido pouco explorada (DUARTE, 2006).

2.4.1. Fluidodinâmica Computacional em Sistemas Multifásicos

2.4.1.1. Modelagem Básica Empregada em Escoamentos Multifásicos

A Fluidodinâmica Computacional consiste na solução da equação geral de transporte empregando métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos, visando obter campos de velocidades, temperatura etc., possibilitando avaliar o transporte de uma propriedade de interesse. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da Engenharia Química, pois em muitos reatores a fluidodinâmica

influencia significantemente a reação química, e os modelos mais simples (1D e 2D) não são capazes de fornecer o grau de detalhamento necessário. Esta dificuldade é devida principalmente ao fato de que em Engenharia Química 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. (DUARTE, 2006).

O estudo da fluidodinâmica de um 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 de equações adotado (DUARTE, 2006).

O estudo de fluidodinâmica de sistemas que envolvem escoamentos multifásicos pode ser dividido em duas classes:

- Euler-Euler;
- Euler-Lagrange.

Neste trabalho foi utilizada uma descrição Euler-Euler, a qual é discutida na seqüência.

2.4.1.2. Modelagem Euler-Euler

Como descrito na tese de doutorado de DUARTE (2006), 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 escoa. Por exemplo, estipulando coordenadas fixas x_I, y_I e z_I nas funções de campo de velocidade, podemos exprimir a velocidade das partículas que passam por essa posição em qualquer instante. Matematicamente pode se escrever $v(x_I, y_I, z_I, t)$. Esta visão é chamada de Lagrangeana.

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.

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

A aceleração das partículas fluidas em um campo de escoamento pode ser avaliada pela superposição de dois efeitos, citados por DUARTE (2006):

- 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 a mudança de posição da partícula, mas sim pela razão da variação do campo de velocidade na posição ocupada pela partícula nos instante t , a qual é chamada de aceleração local.

De acordo com DUARTE (2006), na faixa de interesse da engenharia, quatro leis básicas devem ser satisfeitas para qualquer meio contínuo. São elas:

- a. conservação da matéria (equação da continuidade);
- b. segunda lei de Newton (equação da quantidade de movimento);
- c. conservação da energia (primeira lei da termodinâmica);
- d. segunda lei da termodinâmica.

A Equação (2.2) a seguir representa a lei da conservação de uma propriedade ψ , sendo que para:

$$\psi = 1, \text{ conservação da massa};$$

$$\psi = u, v, w, \text{ balanço da quantidade de movimento};$$

$$\psi = E, \text{ balanço de energia};$$

$$\psi = y_i \text{ transporte da espécie química } i.$$

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

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

Tabela 2.1 – Relações constitutivas

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

As equações são derivadas a partir da conservação da massa e de *momentum*, 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 transformadas necessariamente em sistemas de equações na forma discreta. (DUARTE, 2006).

Os métodos de discretização mais utilizados são:

- Diferenças finitas;
- Volumes finitos;
- Elementos finitos;
- Método híbrido volumes finitos/elementos finitos;
- Métodos espetrais.

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

- Estacionário e não estacionário;
- Compressíveis ou incompressíveis;

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. O software de CFD *FLUENT®-6.1-18* adotado neste trabalho no estudo da fluidodinâmica do leito de jorro utiliza o método de volumes finitos para discretização das equações de balanço de massa, energia e *momentum*. Dependendo da configuração do escoamento diferentes métodos de correção da pressão (acoplagem velocidade pressão) podem ser adotados. São exemplos destes métodos o algoritmo SIMPLE, SIMPLEC e PISO (DUARTE, 2006).

Como citado anteriormente, a técnica de discretização em volumes finitos é bastante utilizada e esta intensa aplicabilidade pode ser justificada no tópico que se segue.

2.5. A Técnica de Volumes Finitos

A maioria dos métodos numéricos podem ser derivados 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 finito, é equivalente aos princípios de conservação sobre cada volume de controle. Quando não ocorrer sobreposição do volume de controle com seus vizinhos, será fácil 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 (DUARTE, 2006).

Embora o Método dos Volumes Finitos, quando converge, forneça resultados dotados de realismo físico, isto 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. 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, pois ajuda na qualidade da solução obtida. Entende-se por função de interpolação, ou esquema numérico, 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 (DUARTE, 2006).

Neste sentido, muitos métodos de interpolação são utilizados para a solução das equações de transporte, muitos deles 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. Sendo assim, os principais passos que devem ser seguidos no desenvolvimento e implementação de esquemas numéricos segundo DUARTE (2006) 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.

2.6. 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 resolvedor de fluxo usado. Adicionalmente, os códigos CFD serão mais robustos e eficientes ao usar uma malha bem construída. Pensando nisto, é importante o analista de CFD saber e entender bastante sobre 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 de malha disponíveis atualmente destacam-se os métodos citados no trabalho de DUARTE (2006), descritos nos sub-itens a seguir.

2.6.1. Métodos de Malha Estruturada

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 torcer ou esticar. 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.

Os métodos multibloco geralmente incluem conexão ponto a ponto, onde os blocos têm que emparelhar topologicamente e fisicamente aos contornos. Enquanto grades de multibloco 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迫使 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.

2.6.2. 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 a maior flexibilidade na conexão dos elementos de malhas.

A vantagem de métodos de malha não-estruturada é que eles são muito automatizados e requer 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 tetraédricos 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, freqüentemente uma malha deve ser feita apresentando densidades de ponto requeridas localmente. Códigos que resolvem problemas de malha não-estruturada requerem mais memória e têm execução mais longa que códigos que resolvem malhas estruturadas.

2.6.3. 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. 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.

2.7. Simulação da Fluidodinâmica por CFD em Leito de Jorro

Em trabalho anterior realizado na Faculdade de Engenharia Química da UFU, DUARTE *et al.* (2005) realizaram um estudo experimental e de simulação pela técnica de CFD sobre a movimentação de partículas em leito de jorro. Neste estudo, foi realizada uma verificação da metodologia da simulação fluidodinâmica do leito de jorro por meio de um Modelo Euleriano Granular Multifásico, a partir da comparação com os dados experimentais de HE *et al.* (1994). Estes autores obtiveram uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados, comprovando a validade da metodologia utilizada. Os resultados de validação obtidos no trabalho de DUARTE *et al.* (2005) são apresentados na seção 2.7.1 a seguir. Utilizou-se também neste trabalho, a técnica de análise de imagens para a determinação de velocidade das partículas em algumas regiões de um leito de acrílico de seção retangular, e verificou-se que as simulações obtidas pela técnica de CFD foram compatíveis com os resultados experimentais.

DU *et al.* (2006) realizaram um estudo de simulação pela técnica de CFD para entender a influência de modelos de arraste na modelagem CFD de um leito de jorro convencional (sem tubo *draft*). Vários modelos de arraste conhecidos na literatura foram revisados e a fluidodinâmica resultante da incorporação de cada modelo foi comparada com os dados experimentais de HE *et al.*, 1994. A análise quantitativa mostrou que os diferentes modelos de arraste levam a diferenças significativas em simulações em fase densa. Os autores verificaram que dentre os modelos de arraste, o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) apresentou as melhores concordâncias com as observações experimentais tanto qualitativamente como quantitativamente.

SHIRVANIAN *et al.*, (2006) realizaram uma simulação numérica tri-dimensional em um leito de jorro retangular com tubo *draft*, utilizando um modelo Euleriano para descrever o escoamento das fases continua (água) e dispersa (partículas) e as equações de conservação de massa e *momentum* foram resolvidas utilizando a técnica de volumes finitos. Os efeitos de velocidade de gás, diâmetro e densidade das partículas sobre a fração de volume de sólidos, zonas de pressão e de velocidade e taxa de recirculação das partículas foram investigados. Os resultados simulados apresentaram boa concordância com os dados experimentais obtidos por SHIRVANIAN e CALO (2006) em um leito de jorro retangular com tubo *draft*.

ZHONG *et al.* (2006, b) simularam tridimensionalmente a movimentação turbulenta de gás e partículas em um leito de jorro-fluidizado de seção retangular. O movimento de partícula foi modelado pelo método de elementos discretos (DEM) e o movimento de gás foi modelado por 2 equações do modelo turbulento k-e. Os autores concluíram por meio destas simulações, que a porcentagem de colisão partícula-partícula decresce com a velocidade do ar de jorro, enquanto que esse valor aumenta com o diâmetro de partícula. Já a porcentagem de colisão partícula-parede não apresenta quase nenhuma variação com o aumento da velocidade de ar de jorro e com o diâmetro da partícula. Esses autores constaram também que a força de arraste domina o movimento de partícula na região de jorro, enquanto a força de contato domina o movimento de partícula na região anular densa, especialmente perto da parede. Além disto, verificou-se que a porcentagem média das forças de ascensão Saffman e Magnus foi de quase zero na região de jorro e na região anular densa, enquanto elas alcançaram 6% das forças totais acrescentadas às partículas na fronteira entre a região de jorro e região anular densa. Outra constatação importante foi que a concentração das partículas aumenta ao longo da direção radial e decresce com aumento da vazão de ar de jorro. Verificou-se também que a componente axial da velocidade da partícula é positiva no centro e negativa na região anular.

2.7.1. Verificação do Modelo Euleriano Granular Multifásico

Como citado anteriormente, DUARTE *et al.* (2005) realizaram uma comparação entre os valores obtidos por simulação pela técnica de CFD e os dados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) a fim de efetuar uma validação do modelo e da metodologia adotada. Estes resultados de validação são apresentados na sub-seção a seguir.

2.7.1.1. Verificação da Metodologia utilizada na Modelagem CFD com Dados Experimentais de HE *et al.* (1994)

Nesta etapa serão apresentados os resultados de validação do modelo Euleriano granular multifásico utilizado na simulação da fluidodinâmica do leito de jorro feita por

DUARTE *et al.* (2005) comparando com os dados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994). Os autores utilizaram um leito de jorro com a geometria mostrada na Figura 2.2, onde estão indicadas as regiões características: anular, de jorro e fonte. Esse trabalho de HE *et al.* (1994) é uma importante referência devido à confiabilidade das técnicas de medida experimental utilizadas pelos autores. Os resultados de verificação referem-se a valores de velocidade da partícula e de porosidade na região de jorro e região anular para diversas alturas axiais.

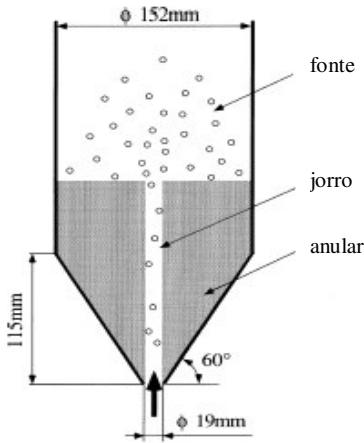


Figura 2.2 - Geometria do leito de jorro, HE *et al.* (1994)

As condições experimentais utilizadas por HE *et al.* (1994) estão apresentadas na Tabela 2.2 a seguir.

Tabela 2.2 - Condições experimentais usadas por HE *et al.* (1994)

Diâmetro da partícula	$d_s = 1,41 \text{ mm}$
Densidade da partícula	$\rho_s = 2503 \text{ Kg/m}^3$
Porosidade do leito estático	$\epsilon_s = 0,412$
Altura do leito estático	$He = 0,325 \text{ m}$
Fluido	Ar a 20°C

Os perfis radiais de velocidades verticais das partículas no leito são apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4 a seguir. Os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) são apresentados na Figura 2.3, enquanto os resultados obtidos por simulação CFD, conforme metodologia definida por DUARTE *et al.* (2005), podem ser vistos na Figura 2.4. Nestas figuras, z refere-se à altura do leito a partir da base. Observa-se nestas figuras que os resultados simulados estão em total acordo com os resultados experimentais de HE *et al.* (1994), tanto qualitativamente como também quantitativamente.

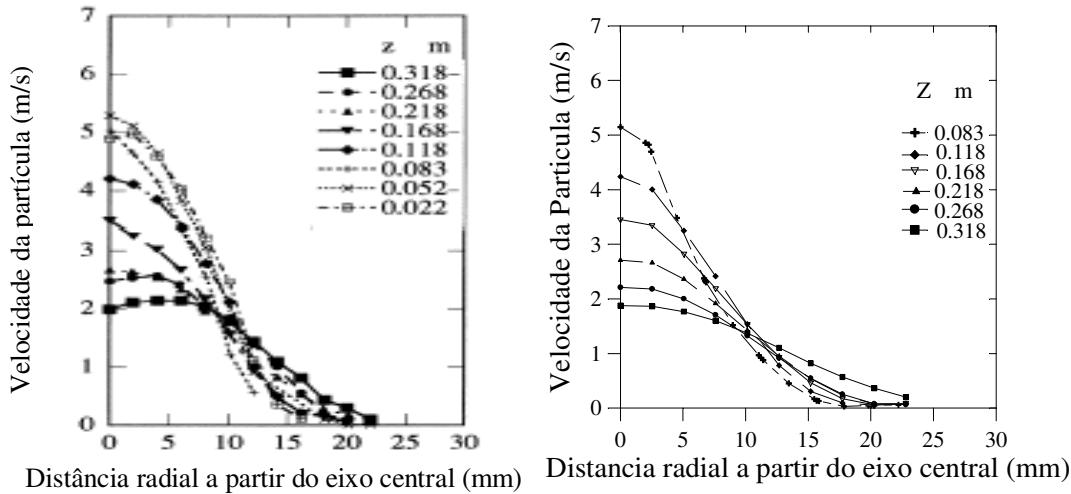


Figura 2.3 - Distribuição de velocidade radial, resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994).

Figura 2.4 - Distribuição de velocidade radial, resultados simulados obtidos por DUARTE *et al.* (2005).

Os perfis radiais de porosidade na região de jorro do leito convencional estudado são apresentados nas Figuras 2.5 e 2.6 a seguir. A Figura 2.5 (que segue a mesma legenda da Figura 2.3) apresenta os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) e a Figura 2.6 representa os valores simulados por DUARTE *et al.* (2005). Os resultados das Figuras 2.5 e 2.6 revelam novamente uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados.

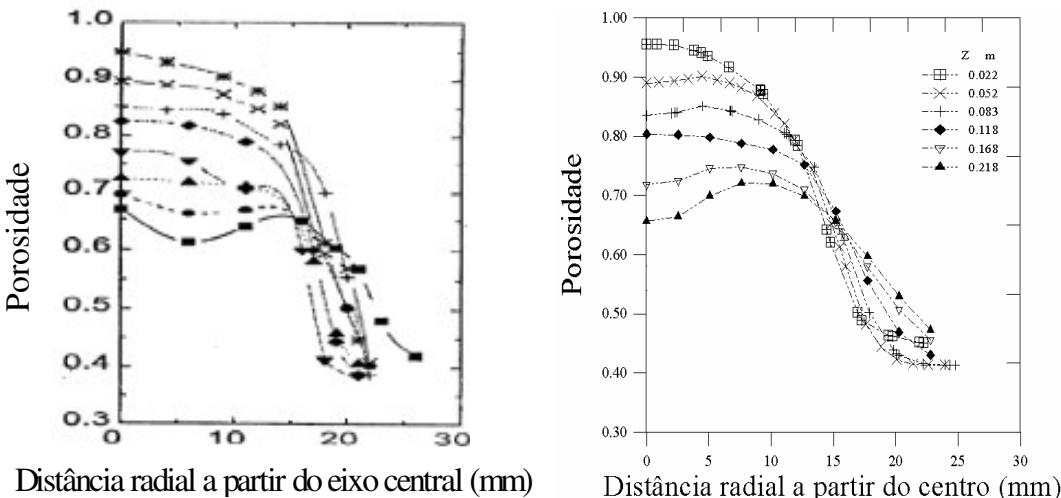


Figura 2.5 - Distribuição radial de porosidade (região de jorro), dados experimentais obtidos por HE et al. (1994).

Figura 2.6 - Distribuição radial de porosidade (região de jorro), resultados simulados por DUARTE et al. (2005).

Com base nos resultados obtidos nas simulações do leito de jorro por CFD para as mesmas condições de HE *et al.* (1994) pôde-se concluir que o modelo adotado representa bem o fenômeno físico real. Sendo assim, a metodologia utilizada na presente dissertação foi a mesma utilizada por DUARTE *et al.* (2005). A verificação desta metodologia pelo trabalho anterior forneceu confiabilidade para o uso da mesma visando alcançar os objetivos propostos nesta dissertação.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Sementes de Soja

As partículas utilizadas neste estudo foram sementes de soja da variedade VENCEDORA fornecidas pela empresa ABC-A&P. A soja foi adotada neste estudo por ser um dos principais produtos de exportação do Brasil e de grande importância econômica na região do Triângulo Mineiro. Além disto, as sementes de soja foram utilizadas em continuidade a trabalhos anteriores de revestimento e de fluidodinâmica destas partículas realizados na (FEQUI/UFU). A fluidodinâmica do leito de jorro usando sementes de soja como partículas está diretamente relacionada com as propriedades físicas das sementes. Assim, as forças gravitacional, de empuxo e de arraste irão agir em cada partícula de acordo com a densidade (ρ_s), esfericidade (ϕ) e diâmetro médio característico (\bar{d}_p) das sementes, dentre outras propriedades. A Tabela 3.1 mostra as propriedades deste material.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas das sementes de soja da variedade VENCEDORA.

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

3.2. Medidas Experimentais de Fluidodinâmica em Leito de Jorro

Todas as simulações obtidas através da técnica de fluidodinâmica computacional em um primeiro momento devem ser validadas através da comparação dos resultados da simulação e os valores obtidos experimentalmente. Os experimentos foram realizados em uma unidade experimental com o leito de jorro que está montada no Laboratório da Unidade Avançada de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) e seus detalhes são mostrados na Figura 3.1 seguindo a ordem da numeração utilizada na figura para identificação de cada componente.

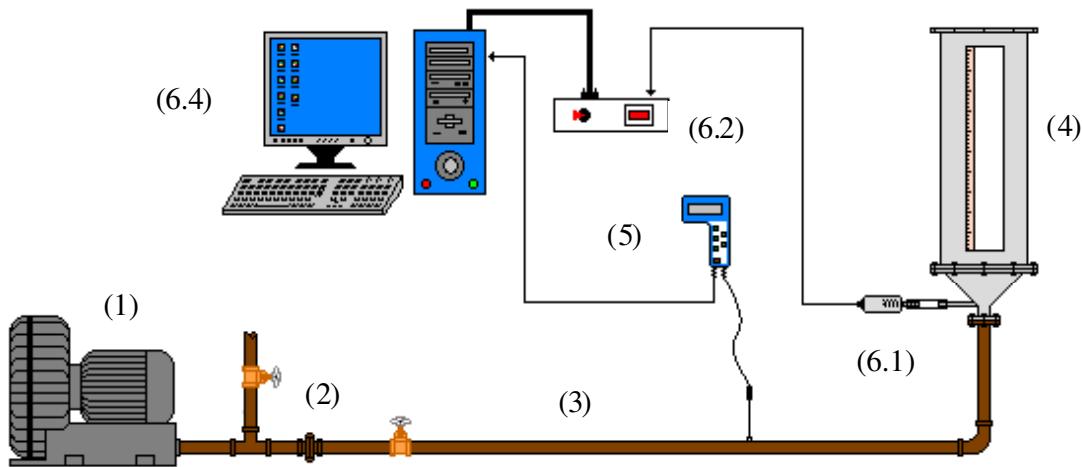


Figura 3.1 - Esquema da unidade experimental do leito de jorro

- (1) Um compressor centrífugo da marca Ibram com 7,5 cv, 3500 rpm e 60 Hz que impulsiona o ar para o sistema;
- (2) Duas válvulas tipo gaveta. Uma válvula primária instalada após a saída do compressor em um sistema de *bypass* para regular a vazão de ar e outra, secundária, instalada na linha de admissão de ar ao leito, para um maior controle sobre a vazão do fluido;
- (3) Tubulação de aço galvanizado com 50,8 mm de diâmetro e, aproximadamente, 3 metros de comprimento, uma curva em 90°, uma luva de união e uma conexão T, todos em aço galvanizado de 2”;
- (4) Um leito de jorro do tipo cone-cilíndrico, construído em aço inoxidável, com visor (ao longo da parte cilíndrica) que permite observar o andamento dos experimentos. As dimensões características do leito estão apresentadas na Tabela 3.2;
- (5) Um termoanemômetro da marca VelociCalc TSI, modelo 8357 com faixa de operação de 0 à 25 m/s, foi instalado a 0,6 m da curva em 90°, para a coleta dos dados de velocidade e temperatura do ar na linha;
- (6) Sistema de aquisição de dados que é composto por:
 - (6.1) Transdutor de pressão da marca DRUCK INCORPORATED - PTX500, com faixa de escala de 0 a 1 psig, instalado na base cônica do leito, logo acima da entrada de ar;

- (6.2) Bloco conector da marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – CB-68LP que faz a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor de pressão e a placa de aquisição de dados A/D (análogo-digital).
- (6.3) Placa de aquisição de dados marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – PCI-6021E com 16 entradas analógicas, que converte sinais do transdutor de pressão para a forma digital.
- (6.4) Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador, com o auxílio do *software* LabVIEW™ 7.1, escolhido para ajustar a freqüência de coleta do sinal de pressão no leito.

3.2.1. Condições Operacionais

A fim de verificar os resultados simulados para as diferentes configurações estudadas (leito convencional e com inserção do tubo *draft*) foram realizados ensaios experimentais em um leito de jorro contendo as seguintes dimensões apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dimensões do Leito de Jorro

Altura da parte cônica	15 cm
Altura da parte cilíndrica	70 cm
Diâmetro da parte cilíndrica	21 cm
Diâmetro da entrada do leito	3,5 cm
Diâmetro do tubo <i>draft</i>	3,5 cm
Ângulo de inclinação da base	60°

Para estudar a influência do tubo *draft* na fluidodinâmica do leito cônico-cilíndrico adotaram-se três alturas de leito estático (He): 16 cm, 19 cm e 22 cm, respectivamente. Para cada altura de leito estático (He) avaliou-se as curvas características, perfis de fração de volume de sólidos simulados e perfis axiais de porosidade e velocidade da partícula simulados para o leito convencional (sem *draft*) e com inserção do tubo *draft* com distâncias à base (Hd) de 4cm, 5,5cm e 7cm, respectivamente. Os resultados para altura de leito estático (He) de 19 cm estão apresentados no Capítulo 4 a seguir, e para as demais configurações nos Anexos 1, 2 e 3.

3.2.2. Descrição da Metodologia Adotada na Obtenção dos Dados Experimentais

O procedimento para obter dados experimentais de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro é descrito a seguir. Foram coletados valores experimentais através do sistema de aquisição de dados, sendo tratados pelo software LabVIEW 7.1. A metodologia utilizada neste trabalho foi a mesma usada por LOURENÇO, 2006. Foram obtidos dados de flutuação de pressão em função do tempo de análise, bem como, de densidade espectral de potência para as diferentes configurações estudadas (veja exemplos destes dados nas Figuras 3.2.a e 3.2.b a seguir). Os resultados de queda de pressão, para obtenção da curva característica do leito de jorro, foram retirados a partir da média das flutuações de pressão para cada condição de vazão de ar.

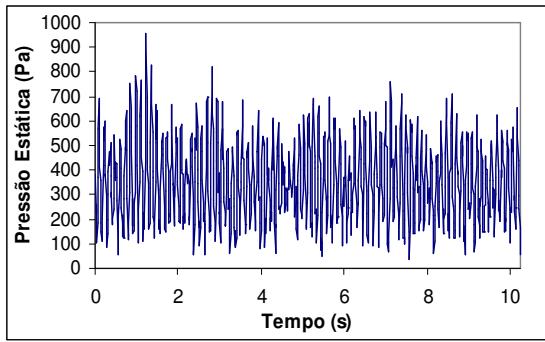


Figura 3.2.a. Flutuação de pressão experimental no jorro estabelecido.
 $He = 19\text{cm}$, $Hd = 7\text{cm}$, $Q = 74,5\text{m}^3/\text{h}$

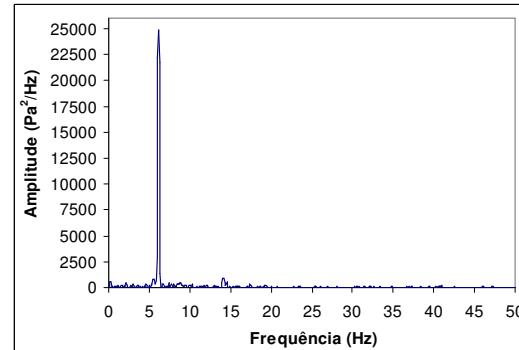


Figura 3.2.b. Espectro de potência experimental no jorro estabelecido.
 $He = 19\text{cm}$, $Hd = 7\text{cm}$, $Q = 74,5\text{m}^3/\text{h}$

3.3. Obtenção da Malha Adotada nas Simulações

A malha computacional foi obtida utilizando o “software” de construção de malhas *Gambit® 2.0.4* que disponibiliza uma interface com o “software” de fluidodinâmica computacional (CFD) *FLUENT® 6.1-18* e representa uma importante ferramenta que disponibiliza vários recursos, os quais permitem a elaboração de malhas desde configurações simples até modelos altamente sofisticados. Cabe ressaltar, no entanto que, o usuário precisa ter larga experiência uma vez que a utilização deste software é muitas vezes complexa. (DUARTE, 2006). As etapas de construção da malha segue a seqüência 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 célula (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, esferas de vidro);
7. Conversão do arquivo contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo software *FLUENT® 6.1-18*;
8. Uma vez lido o arquivo no *FLUENT® 6.1-18*, são definidas as condições de contorno e iniciais, os modelos e os tipos de algoritmos de solução numérica a serem adotados.

A Figura 3.3 mostra a malha adotada nas simulações com 2500 células aproximadamente, sendo que, a contagem das células foi feita no software *FLUENT® 6.1-18*. A parte preenchida com sólidos possuía células triangulares (malha não-estruturada) e o restante do leito células retangulares (malha estruturada). Sabe-se que uma malha refinada gera um maior esforço computacional na simulação, por isso, adotou-se um eixo de simetria no escoamento gás-partícula com intuito de reduzir o esforço computacional.

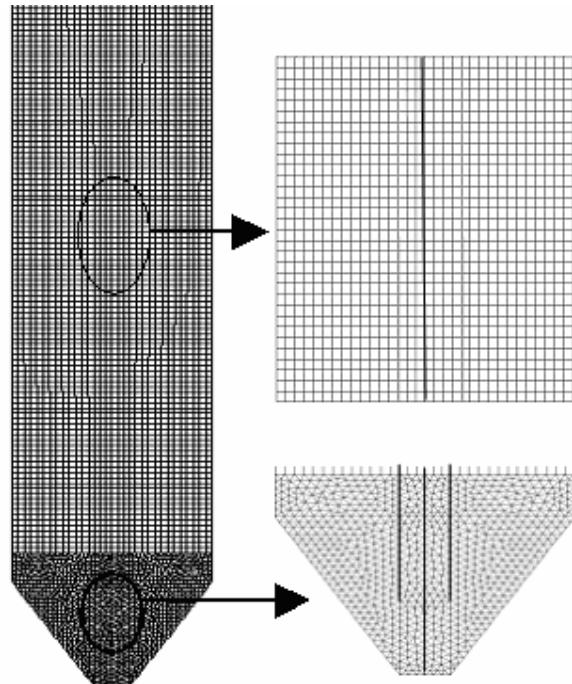


Figura 3.3 - Malha híbrida adotada na simulação do leito de jorro com tubo *draft*.

3.4. Modelagem de Escoamentos Multifásicos via CFD

Os avanços computacionais em mecânica de fluidos promoveram as bases para maior discernimento da dinâmica de escoamentos multifásicos. Atualmente existem duas aproximações para o cálculo dos escoamentos multifásicos: Euler-Lagrange e Euler-Euler. Neste trabalho foi considerada a aproximação do tipo Euler-Euler.

3.4.1. 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 (DUARTE, 2006).

Existem alguns modelos multifásicos Euler-Euler que são classicamente utilizados na literatura: o Modelo de Volume de Fluido (VOF), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano. Neste trabalho aplicou-se o Modelo Euleriano.

3.4.1.1. O Modelo Euleriano

O modelo Euleriano é um dos mais complexos dos modelos multifásicos. Ele resolve um conjunto de n equações dentre elas 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 do tipo de fases envolvidas. Escoamentos 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. Aplicações do modelo multifásico Euleriano incluem colunas de bolhas, suspensão de partículas, leitos fluidizados, leito de jorro dentre outros (DUARTE, 2006).

3.4.2. A Escolha do Modelo Multifásico

O primeiro passo para resolver qualquer problema multifásico é determinar qual dos regimes descritos melhor representa o escoamento desejado. Em geral, uma vez determinado este regime de fluxo deve-se selecionar o modelo apropriado baseado nas regras gerais citadas por DUARTE (2006) a seguir:

- Para bolhas, gotas e partículas em ascensão 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 em ascensão em que as frações volumétricas das fases misturadas ou dispersas excedem 10%, tanto o modelo de mistura ou o modelo Euleriano são indicados.
- Para vazões baixas (“slug flow”), o modelo VOF é indicado.
- Para escoamentos 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 e leitos de jorro, usar o modelo Euleriano granular.
- Para transporte hidráulico, usar o modelo de mistura ou Euleriano.

3.5. Modelagem Fluidodinâmica em Leito de Jorro

Como descrito na seção anterior, o modelo adequado para simulação de fluidodinâmica em leito de jorro é o Modelo Euleriano Granular Multifásico, já que se trata de um transporte pneumático com fluxo granular. Seguem então detalhes sobre o desenvolvimento deste modelo com suas principais equações e conceitos.

3.5.1. Frações Volumétricas

A descrição do fluxo multifásico como interpenetradamente contínua incorpora o conceito de fração de volume da fase, denotada aqui por α_q . Frações de volume representam o espaço ocupado por cada fase, e as leis de conservação de massa e momentum são satisfeitas em cada fase individualmente. A derivação das equações de conservação pode ser feita pela média do conjunto de balanços instantâneos locais para cada fase ou usando a aproximação pela teoria de mistura.

O volume da fase q , V_q é definido por:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (3.1)$$

onde:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.2)$$

A densidade efetiva da fase q é definida por:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3.3)$$

Onde ρ_q é a densidade física da fase q .

3.5.2. Equações de Conservação

As equações gerais de conservação são derivadas e apresentadas nesta seção, seguidas pelas respectivas soluções.

3.5.2.1. Equação da Continuidade

A fração de volume para cada fase é calculada pela equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} \left(\sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt} \right) \quad (3.4)$$

A solução desta equação para cada fase secundária (p), junto com a condição de que a soma das frações volumétricas é igual a um (dada pela Equação 3.2), permite o cálculo da fração volumétrica da fase primária (q). Este tratamento é comum para fluxos fluido-fluido e granulares.

No caso da modelagem em leito de jorro a fase primária é a fase fluida (f) e só existe uma fase secundária que corresponde a fase sólida (s).

3.5.2.2. Equações de Momentum para a Fase Fluida

A conservação de momentum para a fase fluida f é

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) &= -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} \\ &+ \alpha_f \rho_f \left(\vec{F}_f + \vec{F}_{lift,f} + \vec{F}_{vm,f} \right) + \sum_{p=1}^n \left(\vec{K}_{fs} (\vec{v}_s - \vec{v}_f) + \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde \vec{g} é a gravidade e \vec{F}_f , $\vec{F}_{lift,f}$, $\vec{F}_{vm,f}$ e $\bar{\tau}_f$ são definidos a seguir:

Onde $\bar{\bar{\tau}}_f$ é o tensor tensão de cisalhamento para a fase fluida f :

$$\bar{\bar{\tau}}_f = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f \left(\lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f \right) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{\bar{I}} \quad (3.6)$$

Aqui μ_f e λ_f são as viscosidade cisalhante e *bulk* da fase fluida f e \vec{F}_f é a força de campo. O termo $\vec{F}_{lift,f}$ é a força de ascensão que atua na partícula, principalmente devido aos gradientes de velocidade no campo do escoamento da fase primária (f), sendo que, esta força é mais significativa para partículas maiores. Na maioria dos casos, a força de ascensão $\vec{F}_{lift,f}$ é insignificante quando comparada com a força de arraste, então esta força pode ser desprezada. O termo $\vec{F}_{vm,f}$ é a força de massa virtual que é desprezível para o leito de jorro. Esta força só é significante quando a densidade da fase secundária é muito menor que a densidade da fase primária (por exemplo, para uma coluna de bolhas transiente). O termo K_{fs} é o coeficiente de troca de momentum, relativo a interação entre as fases, e p é a pressão de cisalhamento por todas as fases.

\vec{v}_{fs} é a velocidade de interface, definida a seguir. Se $\dot{m}_{fs} > 0$ (i.e., massa da fase s está sendo transferida para a fase f), $\vec{v}_{fs} = \vec{v}_s$; se $\dot{m}_{fs} < 0$ (i.e., massa da fase f está sendo transferida para a fase s), $\vec{v}_{fs} = \vec{v}_f$; e $\vec{v}_{fs} = \vec{v}_{sf}$.

3.5.2.3. Equações de Momentum para a Fase Sólida

De acordo com trabalhos anteriores, como por exemplo, DUARTE (2006) e DU *et al.* (2006), é recomendado o uso do modelo euleriano granular multifásico para descrever o comportamento do fluxo de uma mistura fluido-sólido em leito de jorro. Os tensores de tensão da fase sólida são derivados fazendo uma analogia entre o movimento aleatório das partículas oriundo das colisões partícula-partícula e o movimento térmico das moléculas no gás, levando em conta a inelasticidade da fase granular. Como é o caso para o gás, a intensidade das flutuações de velocidade das partículas determina as tensões, viscosidade, e pressão da fase sólida. A energia cinética associada com as flutuações de velocidade das partículas é representada por uma “pseudo-termal” ou temperatura granular que é proporcional à energia cinética devida à flutuação de velocidade das partículas devido aos choques entre as mesmas.

A conservação de momentum para a fase fluida é similar a Equação 3.5, e para a fase sólida (s) é descrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) &= -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} \\ &+ \alpha_s \rho_s (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) + \sum_{f=1}^N \left(\vec{K}_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) + \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

p_s é a pressão da fase sólida, K_{fs} é o coeficiente de troca de momentum entre a fase fluida f e a fase sólida s , e N é o numero total de fases. Neste trabalho, considerou-se apenas uma fase fluida f e uma fase sólida s .

3.5.3. Coeficientes de Troca na Interfase

Pode se observar nas Equações 3.5 e 3.7 que a troca de momentum entre as fases está baseada no valor do coeficiente de troca para escoamentos granulares, isto é, no coeficiente de troca fluido-sólido K_{fs} .

3.5.3.1. Coeficiente de Troca Fluido-Sólido

O coeficiente de troca fluido-sólido K_{fs} pode ser escrito na forma geral:

$$K_{fs} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{t_s} \quad (3.8)$$

Onde f é definida diferentemente para os diferentes modelos de coeficientes de troca (como descrito a seguir) e t_s , é o “tempo de relaxação de partícula”, é definido como:

$$t_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_f} \quad (3.9)$$

d_s é o diâmetro das partículas .

Todas as definições de f incluem um coeficiente de arraste (C_D) baseado no número de Reynolds (Re). Esta função de arraste que difere os modelos de coeficiente de troca entre si.

- Para o Modelo de SYAMLAL e O'BRIEN (1989):

$$f = \frac{C_D \text{Re}_s \alpha_f}{24 \nu_{r,s}^2} \quad (3.10)$$

Onde a função de arraste tem a forma derivada de DALLA VALLE (1948).

$$C_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{\text{Re}_S / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (3.11)$$

Este modelo é baseado em medições da velocidade terminal de partículas em leitos fluidizados, com correlações que são função da fração de volume e do número de Reynolds relativo.

$$\text{Re}_S = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (3.12)$$

Assim, o coeficiente de troca fluido-sólido tem a forma:

$$K_{fs} = \frac{3\alpha_s \alpha_f \rho_f}{4v_{r,s}^2 d_s} C_D \left(\frac{\text{Re}_S}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_f| \quad (3.13)$$

Sendo $v_{r,S}$ a velocidade terminal para a fase sólida de J. GARSIDE e M. R. AL-DIBOUNI (1977):

$$v_{r,s} = 0,5 \left(A - 0,06 \text{Re}_S + \sqrt{(0,06 \text{Re}_S)^2 + 0,12 \text{Re}_S (2B - A) + A^2} \right) \quad (3.14)$$

Onde:

$$A = \alpha_f^{4,14} \quad (3.15)$$

Para $\alpha_f \leq 0,85$:

$$B = 0,8 \alpha_f^{1,28} \quad (3.16)$$

Para $\alpha_f > 0,85$:

$$B = \alpha_f^{2,65} \quad (3.17)$$

Este modelo é apropriado quando a tensão de cisalhamento dos sólidos é definida pelo modelo de SYAMALAL e O'BRIEN (1993) como mostra a Equação 3.29 da seção 3.5.6.2.

- Para o Modelo de WEN e YU (1966), que é apropriado para sistemas diluídos, o coeficiente de troca fluido-sólido é definido a seguir:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65} \quad (3.18)$$

Onde

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f \text{Re}_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_f \text{Re}_s)^{0,687} \right] \quad (3.19)$$

e Re_s é definido pela Equação 3.12.

- O Modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) é uma combinação do Modelo de WEN e YU (1966) para região diluída e da equação de ERGUN (1952) para fase densa.

Quando $\alpha_f > 0,8$, o coeficiente de troca fluido-sólido K_{fs} é da seguinte forma:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65} \quad (3.20)$$

Onde:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f \text{Re}_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_f \text{Re}_s)^{0,687} \right] \quad (3.21)$$

Quando $\alpha_f \leq 0,8$,

$$K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_f \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \quad (3.22)$$

Este modelo é recomendado para leitos fluidizados densos, e também para leito de jorro.

Nesta dissertação foi comparada a influência desses três modelos de arraste (SYAMLAL e O'BRIEN, 1989; WEN e YU, 1966 e GIDASPOW *et al.* 1992) na simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo *draft*. Para realização deste estudo utilizou-se uma altura de leito estático (He) de 19cm e uma distância do tubo *draft* à base (Hd) de 7cm.

3.5.4. Pressão de Sólidos

Para fluxos granulares em regime compressível (i.e., onde a fração de volume de sólidos é menor que o máximo valor permitido), a pressão de sólidos é calculada independentemente e utilizada para o termo de gradiente de pressão, ∇p_s , na equação de momentum da fase granular. Como existe uma distribuição de velocidade para as partículas, um parâmetro denominado temperatura granular é introduzido no modelo, e aparece nas expressões de pressão de sólidos e de 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 por um termo cinético e um segundo termo devido às colisões entre as partículas.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.24)$$

Onde e_{ss} é o coeficiente de restituição devido à colisão das partículas, $g_{0,ss}$ é a função de distribuição radial e θ_s é a temperatura granular. O software *FLUENT 6.1.18* usa um valor padrão de 0,9 que foi adotado para e_{ss} , mas esse valor pode ser ajustado para servir a cada tipo de partícula. A temperatura granular θ_s será descrita em seção posterior. A função $g_{0,ss}$ (descrita a seguir mais detalhadamente) é a função distribuição que governa a transição da condição “compressível” com $\alpha \leq \alpha_{s,\max}$, onde o espaçamento entre as partículas sólidas pode continuar a decrescer, para a condição “incompressível” com $\alpha = \alpha_{s,\max}$, onde nenhum decréscimo no espaçamento pode ocorrer. Um valor padrão de 0,63 foi adotado para $\alpha_{s,\max}$, mas pode-se modificar este valor durante a inicialização do problema, de acordo com o problema estudado.

3.5.5. Função Distribuição Radial

A função distribuição radial, g_0 , é um fator de correção que modifica a probabilidade de colisões entre os grãos quando a fase granular sólida torna-se densa. Esta função também pode ser interpretada como uma distância não dimensional entre as esferas

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (3.25)$$

Onde s é a distância entre os grãos. Da Equação 3.25 pode ser observado que para uma fase sólida diluída $s \rightarrow \infty$ e $g_0 \rightarrow 1$. No limite onde a fase sólida compacta, $s \rightarrow 0$ e $g_0 \rightarrow \infty$. A função distribuição radial está intimamente conectada ao fator X da teoria não uniforme dos gases de CHAPMAN e COWLING (1990). X é igual a 1 para gases raros, e aumenta e tende a infinito quando as moléculas estão tão próximas umas das outras que o movimento destas não é possível. Na literatura não há uma formulação única para a função distribuição radial.

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.26)$$

Onde $\alpha_{s,\max}$ é especificado pelo usuário na etapa de inicialização do problema. Neste estudo, adotou-se o valor de 0,63 para $\alpha_{s,\max}$ e não foi feita nenhuma variação deste parâmetro.

3.5.6. Tensão de Cisalhamento dos Sólidos

O tensor de tensão de sólidos contém viscosidades *bulk* e de cisalhamento resultantes da troca de momentum entre as partículas devido à translação e colisão. Um componente friccional de viscosidade pode também ser incluído para quantificar a transição plástico-viscosa que ocorre quando partículas da fase sólida alcançam a máxima fração de volume de sólidos.

As partes colisional e cinéticas, e a parte opcional friccional, são somadas para compor o parâmetro denominado viscosidade de cisalhamento dos sólidos, apresentado a seguir:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.27)$$

3.5.6.1. Viscosidade Colisional

A parte colisional da viscosidade de cisalhamento é modelada por

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.28)$$

3.5.6.2. Viscosidade Cinética

O *FLUENT 6.1.18* disponibiliza duas expressões para a parte cinética. A expressão padrão é dada por SYAMLAL *et al.* (1993).

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (3.29)$$

A seguinte expressão opcional por GIDASPOW *et al.* (1992) também está disponível.

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (3.30)$$

3.5.6.3. Viscosidade Bulk

O parâmetro denominado viscosidade *bulk* dos sólidos é usado para quantificar a resistência dos grânulos de partículas à compressão e expansão. Ela possui a seguinte formulação por LUN *et al.* (1984).

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.31)$$

3.5.6.4. Viscosidade Friccional

Em fluxos densos a baixo cisalhamento, onde a fração de volume secundária para a fase sólida se aproxima do limite de empacotamento, a geração de tensão é devido principalmente à fricção entre as partículas. O parâmetro de viscosidade de cisalhamento dos sólidos calculada no *FLUENT 6.1-18*, como padrão, não leva em conta a fricção entre as partículas. Se a viscosidade friccional é incluída nos cálculos o *FLUENT 6.1.18* usa a expressão de SCHAEFFER'S (1987).

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (3.32)$$

Onde p_s é a pressão de sólidos, ϕ é o ângulo de fricção interna, e I_{2D} é a segunda invariância do tensor de tensão deviatórico.

3.5.7. Temperatura Granular

Como mencionado anteriormente no trabalho de DUARTE (2006), a temperatura granular para a fase sólida é proporcional à energia cinética devido ao choque entre as partículas, isto é, proporcional à flutuação da energia cinética das partículas devido aos choques entre as mesmas. A equação de transporte derivada da teoria cinética toma a forma:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \left(-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot \left(k_{\theta_s} \nabla \theta_s \right) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{fs} \quad (3.33)$$

Onde:

$$\left(-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s = \text{geração de energia pelo tensor tensão de sólidos};$$

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

$$\gamma_{\theta_s} = \text{dissipação de energia colisional};$$

$$\phi_{fs} = \text{troca de energia entre a fase fluida } f \text{ e a fase sólida } s.$$

A Equação 3.33 contem o termo $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ descrevendo o fluxo difusivo de energia granular. Quando o modelo padrão de SYAMLAL *et al.* (1993) é utilizado, o coeficiente difusivo para energia granular, k_{θ_s} é dado por

$$k_{\theta_s} = \frac{15d_s \rho_s \alpha_s \sqrt{\theta_s \pi}}{4(41-33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta-3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41-33\eta) \eta \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (3.34)$$

Onde:

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss})$$

O software *FLUENT 6.1.18* usa a seguinte expressão se o modelo opcional de GIDASPOW *et al.* (1992) for escolhido.

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{(\theta_s \pi)}}{384(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1+e_s) \right]^2 + 2 \rho_s \alpha_s^2 d_s (1+e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.35)$$

A dissipação colisional de energia, γ_{θ_s} , representa a taxa de dissipação de energia dentro da fase sólida devido às colisões entre as partículas. Este termo é representado pela expressão derivada de LUN *et al.* (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (3.36)$$

A transferência de energia cinética da flutuação randômica nas velocidades das partículas da fase sólida (*s*) para a fase fluida (*f*) ou sólida é representada por ϕ_{fs} :

$$\phi_{fs} = -3K_{fs}\theta_s \quad (3.37)$$

O *FLUENT 6.1.18* geralmente usa uma relação algébrica para a temperatura granular. Esta tem sido obtida negligenciando convecção e difusão na equação de transporte, 3.33.

3.5.8. Demais Métodos Utilizados nas Simulações

Para as simulações por CFD realizadas neste trabalho o método de discretização empregado foi o de volumes finitos. O tratamento do acoplamento entre a pressão e a velocidade foi feito por meio do algoritmo SIMPLE. Para as interpolações da equação do movimento e das frações de volume foi utilizado o esquema *upwind* de primeira ordem. As condições de contorno utilizadas foram velocidade do ar na estrada do leito e pressão na saída. Adotou-se um perfil parabólico, por meio de uma função definida pelo usuário (UDF), para a determinação da velocidade do ar na entrada.

3.6. Metodologia para Obtenção das Curvas Características Simuladas

Para obter as curvas características simuladas de cada configuração do leito de jorro foram realizadas diversas simulações para cada curva, onde cada vazão de ar compreendia uma simulação distinta. Para as simulações do leito de jorro com tubo *draft*, realizava-se inicialmente uma simulação considerando o *draft* como INTERIOR, isto é, como se fosse um leito de jorro convencional (sem tubo) e a partir de uma condição em que o leito já estivesse no regime de jorro estabelecido, definia-se o *draft* como WALL (parede), e reduzia-se o valor da velocidade do ar na entrada, dando inicio às simulações do leito de jorro com tubo *draft*.

Depois de certo tempo de simulação (aproximadamente 4 seg.), reduzia-se o valor da velocidade do ar de entrada na função definida pelo usuário (UDF), e colocava-se para simular por mais um tempo, e assim sucessivamente até obter a curva característica simulada. Vale ressaltar que não era feita uma reinicialização do problema, mas sim, que cada nova simulação iniciava-se a partir das condições de regime obtidas na simulação anterior. Para cada uma das simulações o valor da pressão foi obtido a partir da média das flutuações de pressão ao longo do tempo de simulação (veja exemplo destes dados na Figura 3.4 a seguir), utilizando a mesma metodologia da obtenção dos dados experimentais.

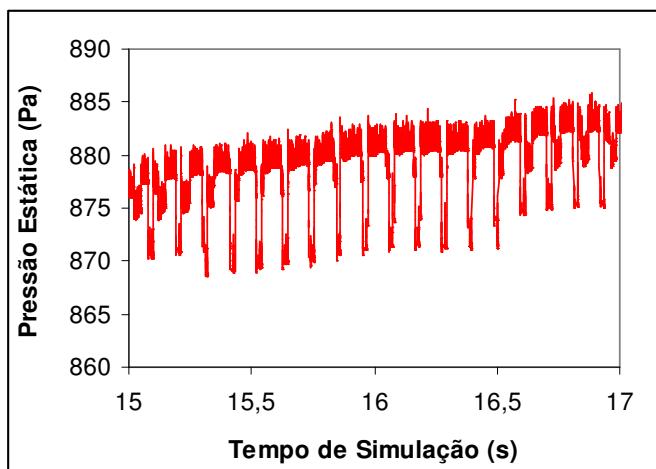


Figura 3.4. Flutuação de pressão simulada vs. tempo de simulação na condição de jorro estabelecido. ($He = 19\text{cm}$, $Hd = 7\text{cm}$, $Q = 74,5\text{m}^3/\text{h}$)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será dividido em três seções principais. Inicialmente em uma primeira seção (4.1) são apresentados os resultados de flutuação de pressão e espectros de potência obtidos experimentalmente para uma das configurações analisadas. Posteriormente na seção (4.2) será discutido o efeito de modelos de arraste na simulação da fluidodinâmica do leito de jorro com tubo *draft*. Escolhido o melhor modelo serão apresentados os resultados e discussões do efeito da inserção do tubo *draft* na fluidodinâmica do leito de jorro (seção 4.3).

4.1. Obtenção da Curva Característica Experimental

A seguir são apresentados alguns resultados experimentais típicos obtidos para uma condição de altura de leito estático (H_e) de 19 cm e com tubo *draft* situado à uma distância da base (H_d) de 7cm, para alguns regimes característicos do leito de jorro.

4.1.1. Leito Fixo

O leito fixo é caracterizado pela passagem do gás pelos interstícios inter-partículas, não promovendo dessa forma movimento das mesmas. Observa-se na Figura 4.1.a os valores de flutuação de pressão, para a condição de leito fixo. Já na Figura 4.1.b verificou-se que os espectros de potência não demonstraram, de uma forma geral, picos característicos e sim uma tendência de picos ao longo da região estudada. Contudo, o aparecimento de forma mais pronunciada, de um ou dois picos na região compreendida entre 40Hz e 45Hz chamaram a atenção. Qualitativamente, esta tendência também foi encontrada por outros autores, como por exemplo, TARANTO (1996) utilizando um leito bidimensional.

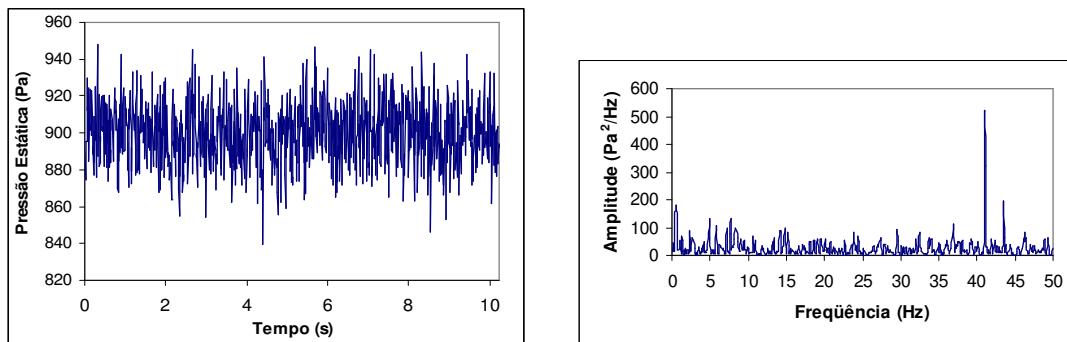


Fig. 4.1.a. Flutuação de pressão no leito fixo.
 $He=19\text{cm}$, $H_d=7\text{cm}$, $Q=15,7\text{m}^3/\text{h}$.

Fig. 4.1.b. Espectro de potência no leito fixo.
 $He=19\text{cm}$, $H_d=7\text{cm}$, $Q=15,7\text{m}^3/\text{h}$.

4.1.2. Expansão

As Figuras 4.1.c. e 4.1.d., a seguir, apresentam a flutuação de pressão e os espectros de potência em vazões próximas à equivalente ao ponto de perda de carga máxima. Neste caso, mesmo já se iniciando o deslocamento das partículas, continua a se perceber uma tendência de picos, principalmente em algumas regiões de baixa freqüência.

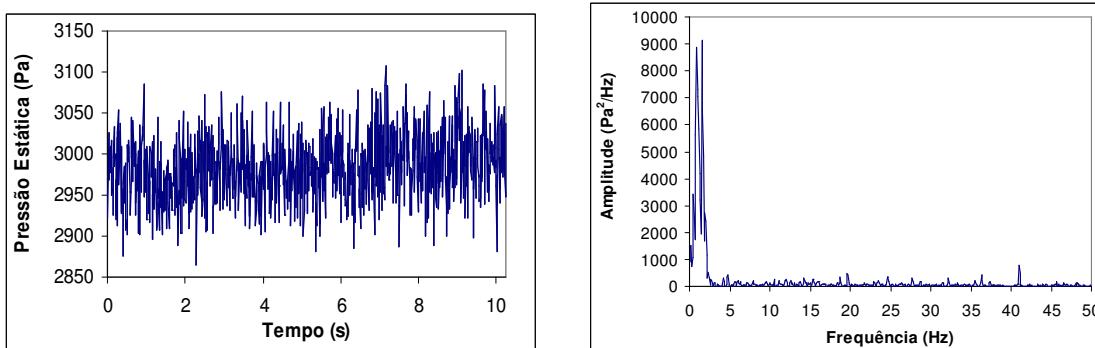


Fig. 4.1.c. Flutuação de pressão na expansão.
He=19cm, Hd=7cm, Q=31,2m³/h

Fig. 4.1.d. Espectro de potência na expansão.
He=19cm, Hd=7cm, Q=31,2m³/h

4.1.3. Jato Interno

As Figuras 4.1.e. e 4.1.f. mostram a flutuação de pressão e os espectros de potência na condição de jato interno. Quando se notou a presença da formação da cavidade interna, que dá origem ao canal preferencial central, verificou-se uma mudança no comportamento dos espectros de potência. Foi possível a identificação de duas bandas bem definidas, sendo a primeira banda numa região de 6Hz a 9Hz, e outra de menor amplitude na faixa de 14 a 16Hz. Esse comportamento também foi observado para as demais condições estudadas.

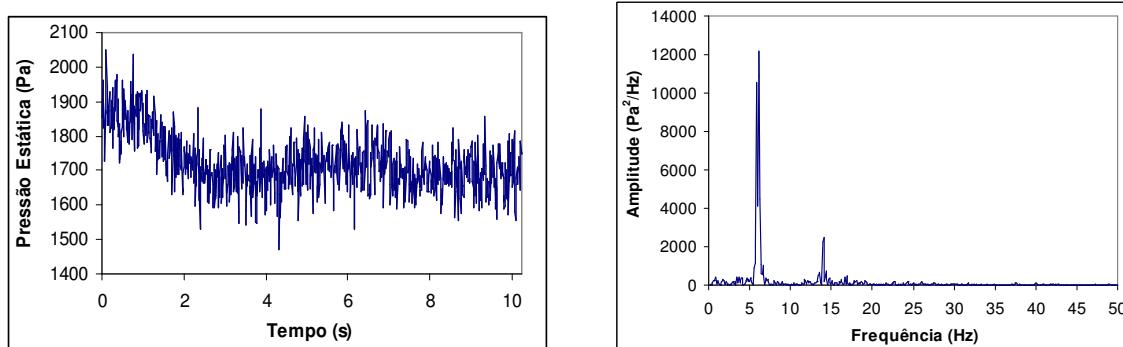


Fig. 4.1.e. Flutuação de pressão no jato interno.
He=19cm, Hd=7cm, Q=60,6m³/h

Fig. 4.1.f. Espectro de potência no jato interno. He=19cm, Hd=7cm, Q=60,6m³/h

4.1.4. Jorro Estabelecido

Observa-se nas Figuras 4.1.g e 4.1.h. a seguir, a flutuação de pressão e os espectros de potência na condição de jorro estabelecido. No caso da região de jorro estabelecido, observou-se uma banda de freqüência dominante em 6Hz. XU *et al.* (2004), trabalhando com jorro convencional, operando com esferas de vidro, encontrou bandas dominantes de freqüência na região de 6Hz a 8Hz.

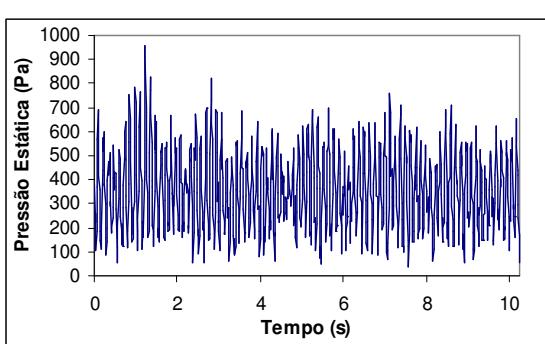


Fig. 4.1.g. Flutuação de pressão no jorro estável. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$, $Q=74,6\text{m}^3/\text{h}$

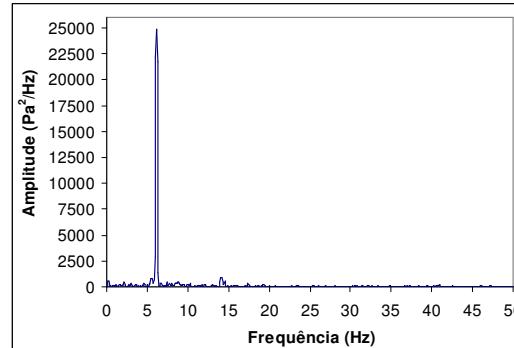


Fig. 4.1.h. Espectro de potência no jorro estável. $He=19\text{cm}$, $Hd=7\text{cm}$, $Q=74,6\text{m}^3/\text{h}$

A partir desses dados experimentais de flutuação de pressão, foram calculados valores médios de pressão em função de cada valor da vazão de ar, sendo possível obter as curvas características experimentais para as configurações estudadas. Os resultados experimentais de flutuação de pressão e espectros de potência para as demais configurações com *draft* estudadas são apresentados no Anexo 1.

4.2. Influência do Modelo de Arraste

A fim de avaliar qual modelo de arraste que melhor descreve o regime de fluxo multifásico em um leito de jorro com *draft*, foram estudados os modelos WEN e YU (1966), SYAMLAL e O'BRIEN (1989) e GIDASPOW *et al.* (1992) normalmente utilizados em simulações de CFD e apresentados no capítulo anterior. Adotou-se, nesta etapa, uma condição de altura de leito estático (He) de 19 cm e uma distância do tubo *draft* à base (Hd) de 7 cm.

A seguir serão apresentadas as curvas características de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro experimental e simulada pelos três modelos de arraste, bem como, resultados de fração de volume de sólidos e perfis axiais de porosidade e velocidade da partícula simulados para cada modelo de arraste.

4.2.1. Curvas Características Experimental e Simulada

A Figura 4.2 mostra as curvas características experimental e simuladas. Foram apresentadas três curvas simuladas originadas da aplicação dos três modelos de arraste estudados: GIDASPOW *et al.* (1992), SYAMLAL e O'BRIEN (1989) e WEN e YU (1966). Observa-se na Figura 4.2 uma boa concordância qualitativa entre os resultados simulados pelos três modelos e os valores experimentais de vazões decrescentes (volta), sendo que o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) foi o que mais se aproximou dos dados experimentais. Vale ressaltar que as curvas características simuladas foram obtidas a partir de 20 simulações (aproximadamente) feitas com vazões decrescentes de ar.

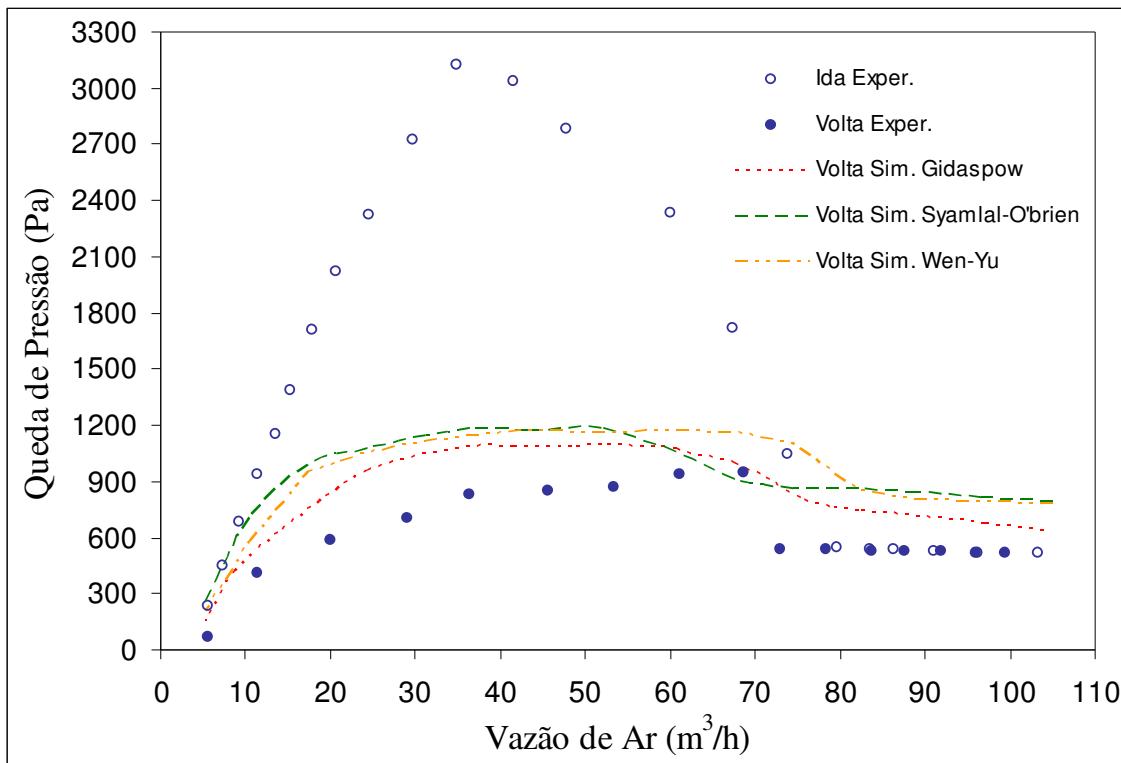


Figura 4.2 - Curvas características experimental e simulada para cada modelo de arraste.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam resultados de vazão de ar de jorro e queda de pressão experimental e simuladas pelos três modelos de arraste estudados na condição de jorro mínimo.

Tabela 4.1 - Valores de vazão de jorro mínimo experimental e simulada

Modelos	Vazão Exp. (m^3/h)	Vazão Sim. (m^3/h)	Desvio Relativo (%)
Gidaspow		67,5	1,5
Syamlal O'Brien	68,6	60,6	11,6
Wen Yu		74,5	8,6

Tabela 4.2 - Queda de pressão experimental e simulada no jorro mínimo

Modelos	ΔP Exp. (Pa)	ΔP Sim. (Pa)	Desvio Relativo (%)
Gidaspow	947,3	1005,9	6,2
Syamlal O'Brien		1060,5	11,9
Wen Yu		1116,1	17,8

Observa-se nos resultados destas tabelas que o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) é o que mais se aproximou dos dados experimentais de vazão de jorro mínimo e queda de pressão, apresentando os menores erros relativos. Verificou-se também que o modelo de SYAMLAL e O'BRIEN (1989) subestimou o valor da vazão de jorro mínimo, enquanto que o modelo de WEN e YU (1966) o superestimou. As respectivas quedas de pressão simuladas foram superestimadas por ambos os modelos.

O modelo de arraste que apresentou os resultados mais distantes dos dados experimentais foi o de WEN e YU (1966), que foi originalmente desenvolvido para regiões mais diluídas, e por isso, não apresenta uma distinção entre as faixas de porosidade nas diferentes regiões do leito.

O modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) faz uma combinação do modelo de WEN e YU (1966) para regiões mais diluídas e da clássica equação de ERGUN (1952) que é comumente aplicada a sistemas mais concentrados, e bem comprovada na literatura com vários trabalhos que reiteram sua aplicabilidade. Além disto, este modelo utiliza uma correlação para o cálculo do coeficiente de arraste (C_D) verificada em diversos trabalhos da literatura. Isto pode explicar os resultados simulados mais próximos aos experimentais obtidos utilizando este modelo de arraste.

No modelo de SYAMLAL e O'BRIEN (1989) também há uma diferenciação entre regiões mais densas e diluídas e os autores utilizam uma correlação empírica para o cálculo do coeficiente de arraste (C_D). O fato de que a correlação de C_D presente neste modelo ainda não ser muito testada na literatura, pode explicar uma previsão não tão boa deste modelo quando comparada ao modelo de GIDASPOW *et al.* (1992).

4.2.2. Perfis de Fração de Volume de Sólidos Simulados para cada Modelo

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os perfis de fração de volume de sólidos simulados pelos três modelos de arraste: GIDASPOW *et al.* (1992), SYAMLAL e O'BRIEN (1989) e WEN e YU (1966), respectivamente. Nota-se que as frações de volume de sólidos em leitos de jorro podem variar de zero até o limite máximo de empacotamento, portanto, a escolha do modelo de arraste exerce uma influência significativa na simulação CFD de um leito de jorro.

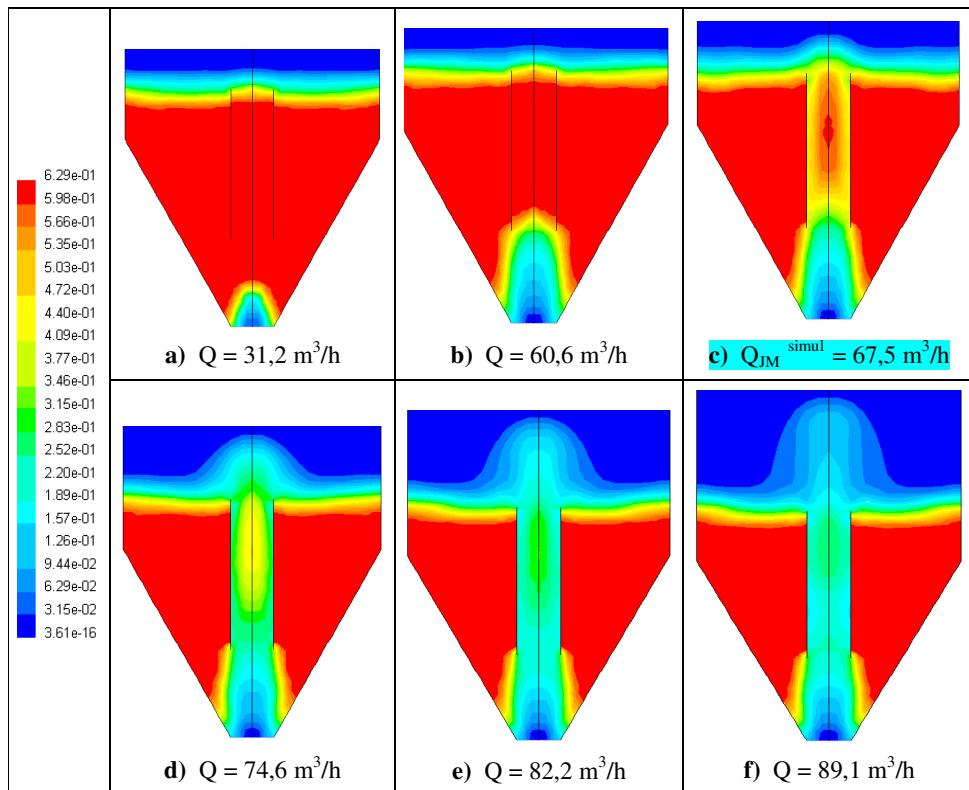
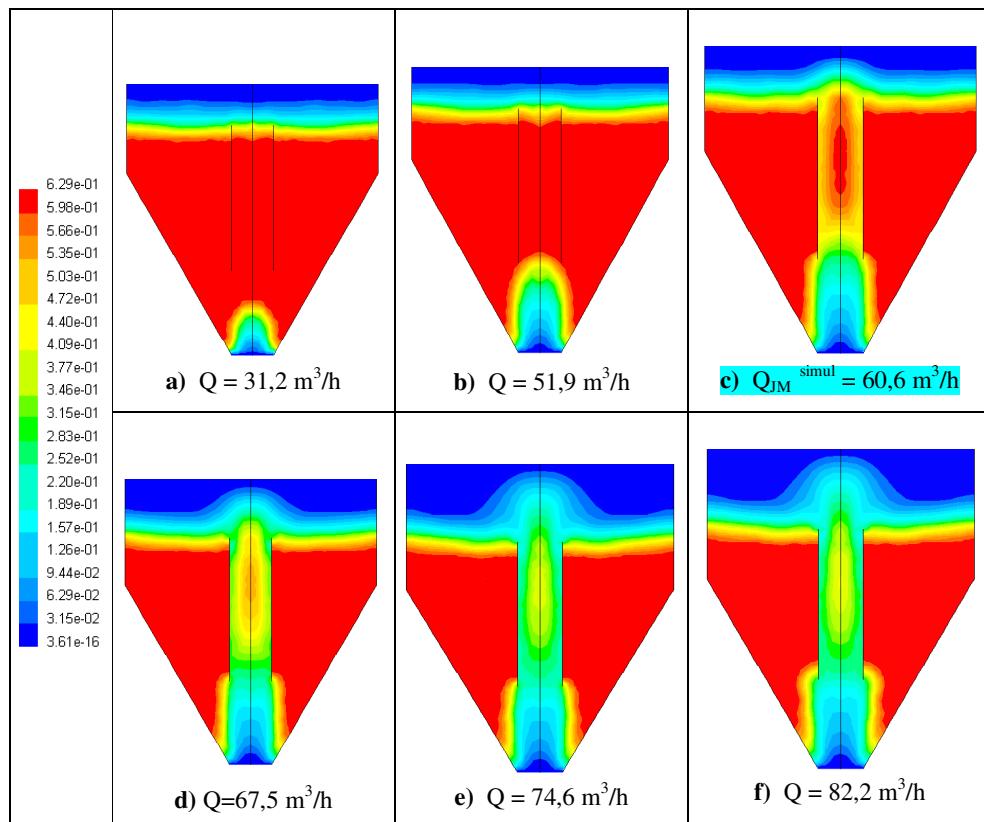
Figura 4.3 - Fração de volume de sólidos simulados por GIDASPOW *et al.* (1992).

Figura 4.4 - Fração de volume de sólidos simulados por SYAMLAL e O'BRIEN (1989).

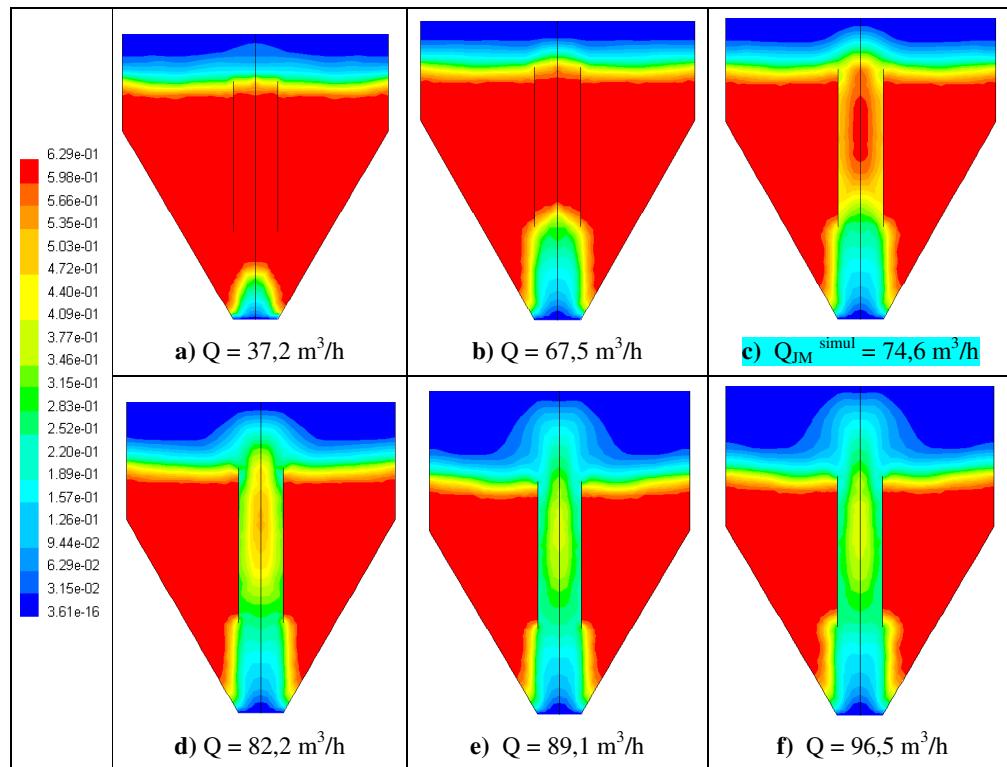
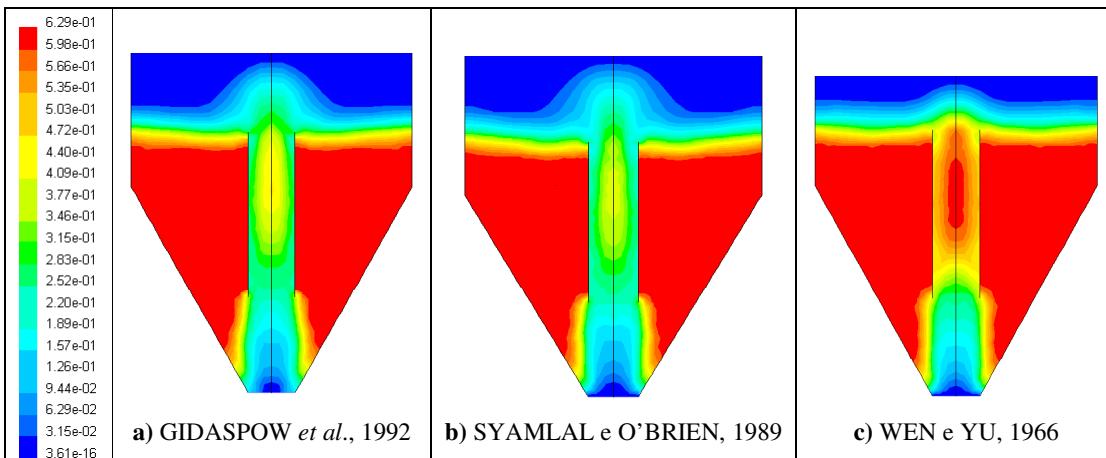


Figura 4.5 - Fração de volume de sólidos simulados por WEN e YU (1966).

Foi possível constatar, nos perfis de fração de volume de sólidos, as diferentes condições de mínimo jorro simuladas por cada modelo de arraste estudado, bem como, as diferenças significativas existentes entre os modelos, especialmente para vazões acima do jorro mínimo. O modelo que prevê a menor vazão de mínimo jorro é o de Syamlal e O'Brien e o que prevê a maior vazão de mínimo jorro é o de Wen e Yu. Vale lembrar que a vazão de mínimo jorro prevista pelo modelo de Gidaspow é a mais próxima dos dados experimentais. A Figura 4.6 mostra os perfis simulados de fração de volume de sólidos para cada modelo, a uma vazão 10% acima da vazão de jorro mínimo experimental ($Q_{\text{IJM}}^{\text{exp}} = 74,6 \text{ m}^3/\text{h}$).

Figura 4.6 - Fração de volume de sólidos para os três modelos de arraste ($Q = 74,6 \text{ m}^3/\text{h}$).

Verificou-se na Figura 4.6 que para as simulações utilizando os modelos de GIDASPOW *et al.*, 1992 (a) e SYAMLAL e O'BRIEN, 1989 (b) há uma variação na distribuição de porosidade na região de interface jorro-anular abaixo do *draft*, o que está de acordo com relatos da literatura. Já para o modelo de WEN e YU, 1966 (c), na região abaixo do *draft* há uma distribuição uniforme de porosidade na região de interface jorro-anular.

Uma explicação para o modelo de WEN e YU, 1966 não prever bem esta região de interface, onde ocorre uma grande variação nos valores de porosidade, é o fato de que ele foi originalmente desenvolvido para sistemas diluídos, não incorporando nas suas equações o efeito da variação da porosidade de acordo com o regime de escoamento no interior do leito.

Pode ser observado também na Figura 4.6 que nos resultados oriundos das simulações utilizando os modelos de GIDASPOW *et al.*, 1992 (a) e SYAMLAL e O'BRIEN, 1989 (b), apesar de apresentarem uma distribuição radial de porosidade não uniforme, existem diferenças significativas nestes perfis. Como os resultados simulados pelo modelo de Gidaspow foram os que melhor reproduziram os dados experimentais, acredita-se que esta interface seja mais bem caracterizada pela utilização deste modelo.

4.2.3. Perfis Axiais de Porosidade e Velocidade da Soja Simulados para cada Modelo

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 a seguir mostram os perfis de porosidade axial em função da posição radial, na região de jorro, para os três modelos de arraste estudados, a uma vazão aproximadamente 20% superior a vazão de jorro mínimo experimental ($Q_{1,2JM}^{exp}=82,22m^3/h$). Estes perfis simulados de porosidade na região de jorro apresentam uma distribuição radial que se inicia no centro do leito (0 m) e vai até a posição de 0,0175 m, que corresponde à metade do diâmetro do tubo *draft*, visto que se adotou um eixo de simetria no leito. Verificou-se que, para alturas axiais (h) maiores que 7 cm (região interna do *draft*), o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) apresentou valores de porosidade maiores que os demais. Observa-se também que próximo ao eixo de simetria, um aumento na altura axial (h) provoca um aumento na concentração de partículas. Observa-se também que, para alturas axiais (h) inferiores a 7 cm (abaixo do *draft*), em todos os casos há um comportamento distinto do anterior, ou seja, um aumento da distância radial a partir do centro aumenta a concentração de partículas (menor porosidade). Entretanto, para distâncias axiais (h) superiores a 7 cm (a partir da presença do tubo) ocorre uma inversão do perfil de porosidade, que passa a ser menor no centro e maior próxima à parede do *draft*.

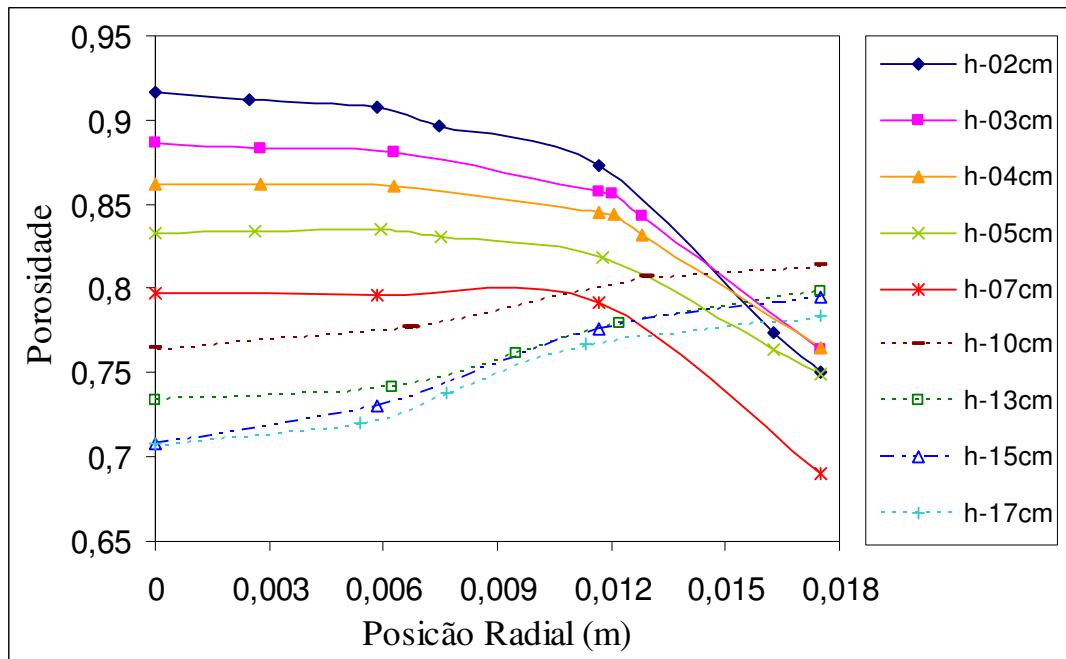


Figura 4.7 - Perfis de porosidade na região de jorro por GIDASPOW *et al.* (1992).

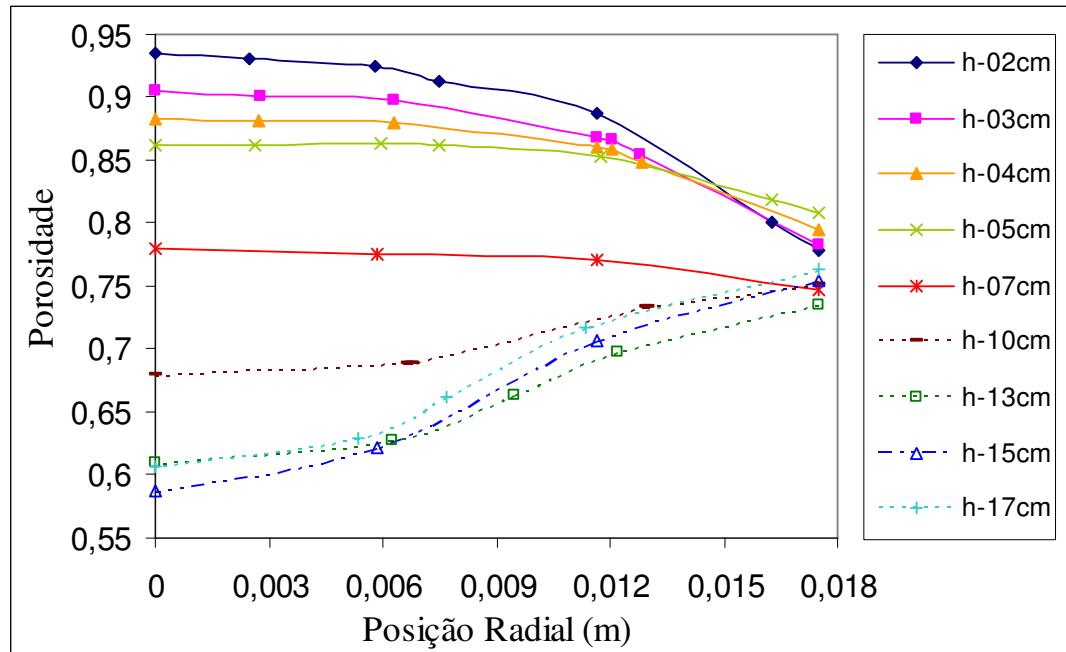


Figura 4.8 - Perfis de porosidade na região de jorro por SYAMLAL e O'BRIEN (1989).

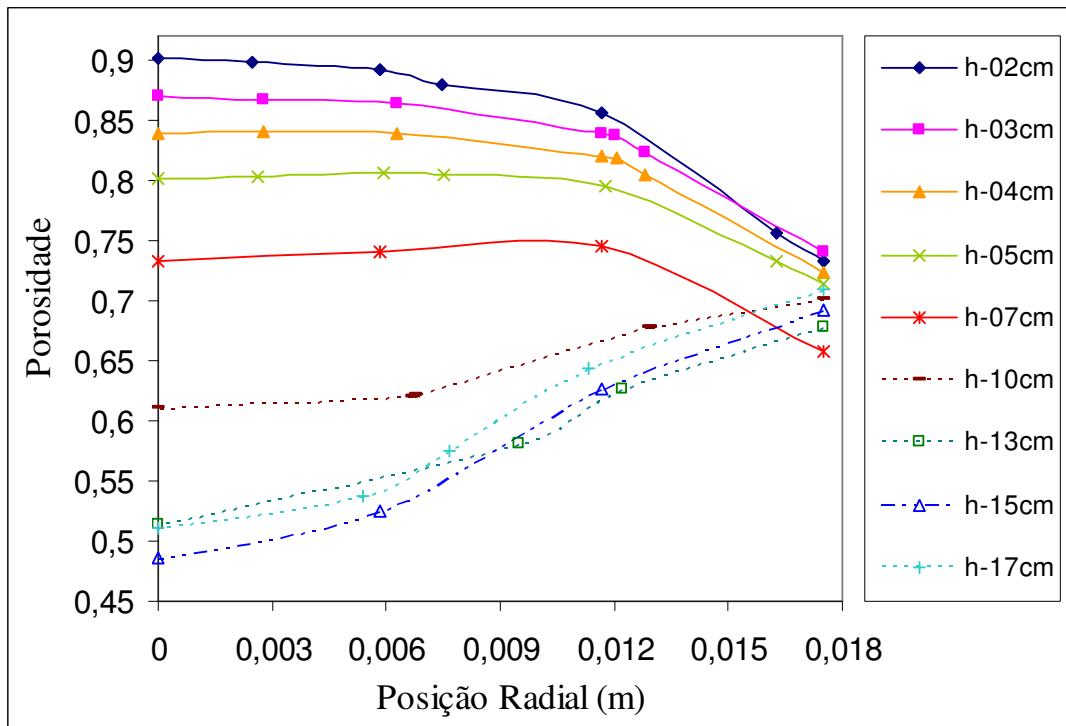


Figura 4.9 - Perfis de porosidade na região de jorro por WEN e YU (1966).

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam diversos perfis de velocidade de partícula para a região anular, em várias posições axiais (h), bem como sua distribuição radial, para os três modelos avaliados à mesma vazão de $82,22\text{m}^3/\text{h}$. Verificou-se que para alturas axiais (h) inferiores a 7cm (abaixo do tubo *draft*) e posições radiais próximas a região de interface jorro-anular ocorrem velocidades positivas da partícula, indicando um arraste das mesmas pelo ar de jorro. Estes perfis simulados de velocidade de sólidos na região anular apresentam uma distribuição radial que se inicia na posição de 0,0175 m, que corresponde à região de interface jorro-anular e onde se situa o tubo *draft*, até a posição de 0,105m que corresponde à parede do leito. Observou-se que o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) apresentou valores de velocidade das partículas superiores aos demais modelos, indicando que este modelo prevê um maior arraste das partículas pelo ar de jorro na região de recirculação de partículas abaixo do tubo *draft*. Nota-se também que na região anular há um perfil parabólico e negativo de velocidade da partícula, indicando o movimento descendente das partículas percorrendo toda extensão da região anular.

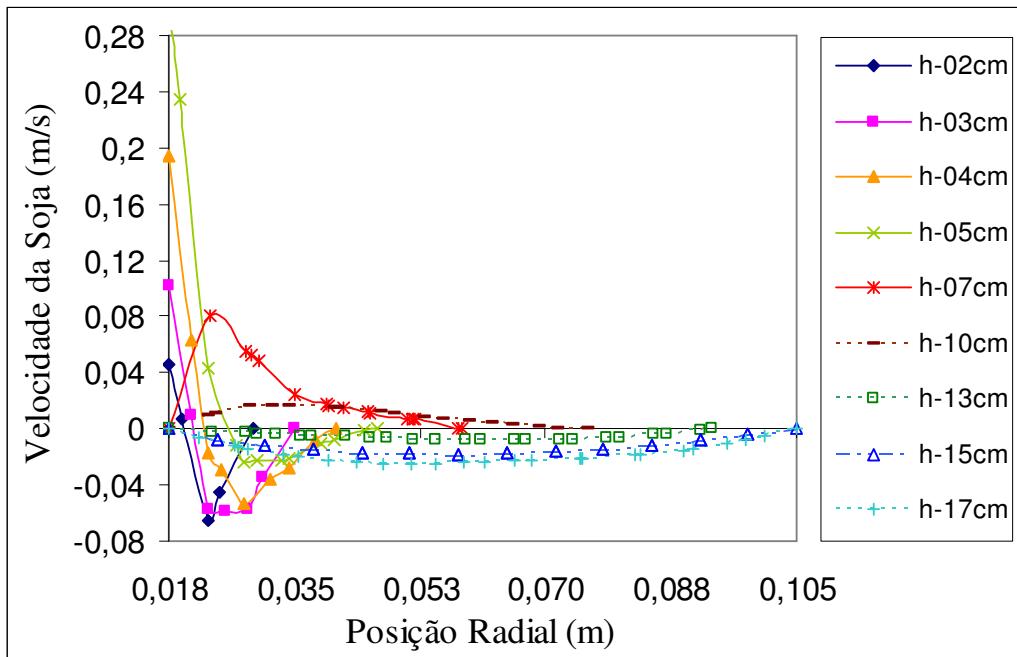


Figura 4.10 - Perfis de velocidade da soja na região anular por GIDASPOW *et al.* (1992).

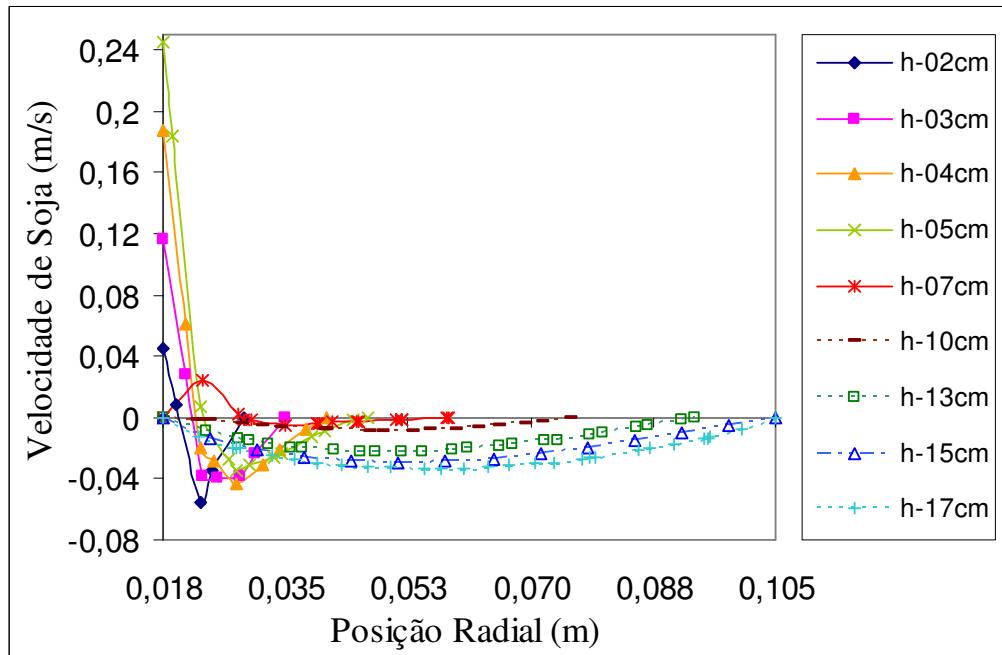


Figura 4.11 - Perfis de velocidade da soja na região anular por SYAMLAL e O'BRIEN (1989).

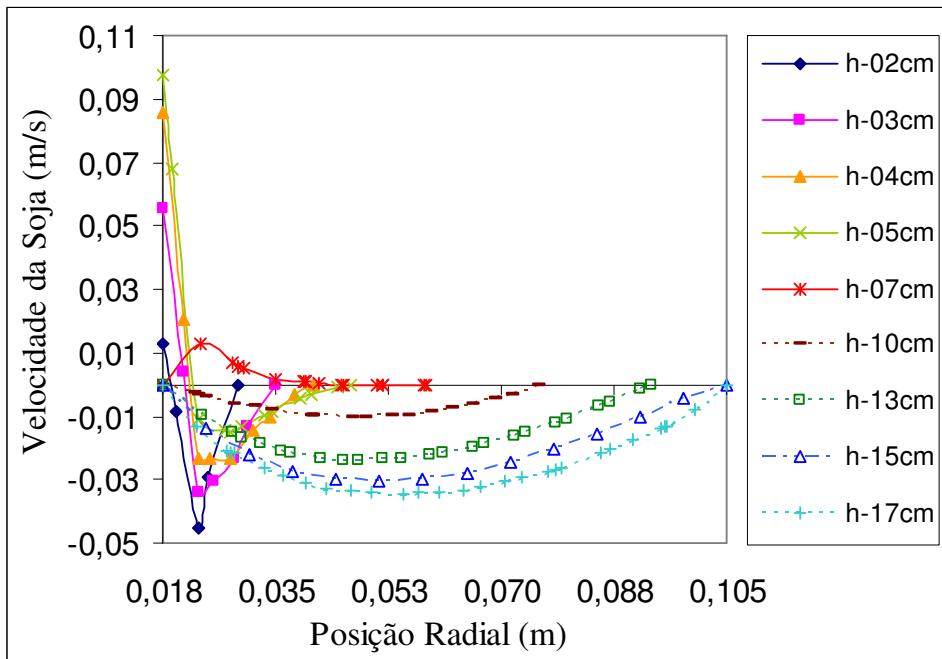


Figura 4.12 - Perfis de velocidade da soja na região anular por WEN e YU (1966).

Os resultados apresentados nesta seção mostraram que o modelo de arraste interferiu significativamente na fluidodinâmica do leito de jorro com tubo *draft*, sendo que a utilização do modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) originou em simulações com resultados mais próximos aos dados experimentais de queda de pressão e vazão de ar no jorro mínimo. Sendo assim, este modelo foi o escolhido para as simulações apresentadas na próxima seção.

Observou-se também nos resultados supracitados que a inserção do tubo *draft* separando a região anular da região de jorro, fez com que ocorressem duas regiões distintas, uma anterior ao tubo *draft* (região compreendida entre o *draft* e a base) e outra a partir da presença do *draft*. Este comportamento será mais discutido na próxima seção, bem como, a diferença entre os perfis fluidodinâmicos entre as configurações com tubo interno e leito de jorro convencional.

4.3. Influência da Inserção do Tubo *Draft*

4.3.1. Curvas Características Experimentais e Simuladas para as Configurações: Convencional e Com Tubo *Draft*

A Figura 4.13 mostra as curvas características obtidas experimentalmente para as três distâncias do *draft* à base (H_d) para uma condição de altura de leito estático (H_e) de 19 cm. Observa-se que para vazões crescentes de ar (ida) que à medida que se aumenta a distância do *draft* à base (H_d), há um acréscimo na queda de pressão máxima do leito. Nota-se também

que na região de queda de pressão de jorro estável há um incremento na queda de pressão à medida que se aumenta a distância do *draft* à base (Hd).

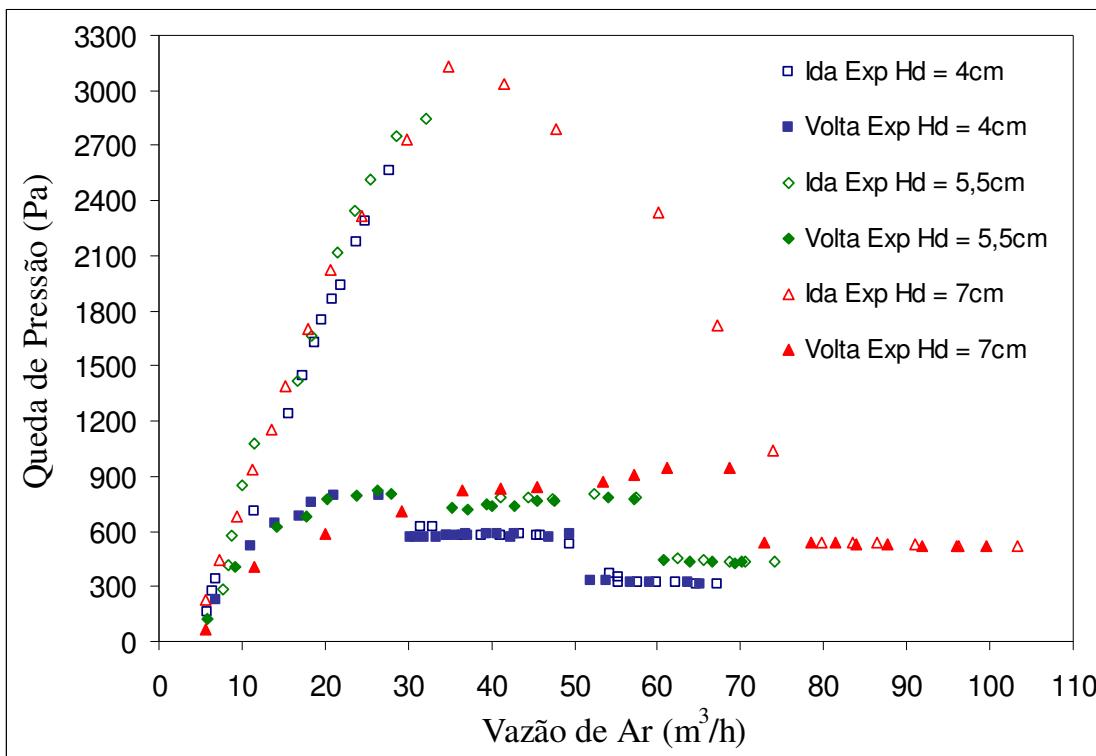


Figura 4.13 - Curvas características experimentais para as três distâncias do *draft* à base (Hd)

A Figura 4.14 apresenta as curvas características experimental e simulada para o leito de jorro convencional (sem *draft*). Na seqüência as Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram as curvas características experimentais e simuladas para os leitos de jorro com tubos *drafts* situados à distâncias da base (Hd) de 4; 5,5 e 7cm, respectivamente. Nestas Figuras, são apresentados os dados experimentais, para uma altura de leito estático (He) de 19 cm, de vazões crescentes (ida) e decrescentes (volta), bem como de vazões simuladas.

É importante ressaltar que nas Figuras 4.14 a 4.17 as curvas simuladas foram obtidas com base em 20 simulações aproximadamente, referentes a diferentes valores de vazão de ar alimentadas. Para cada uma das simulações o valor da pressão foi obtido a partir da média das flutuações de pressão ao longo do tempo de simulação.

Observa-se que na região de maior queda de pressão as curvas simuladas, em todos os casos, estão posicionadas de forma intermediária aos dados experimentais de vazões crescentes (ida) e decrescentes (volta), porém mais próximos dos dados de vazões decrescentes. Isto pode ser explicado pelo fato de que as condições de simulação provavelmente estão mais próximas das de um leito descompactado (vazões decrescentes).

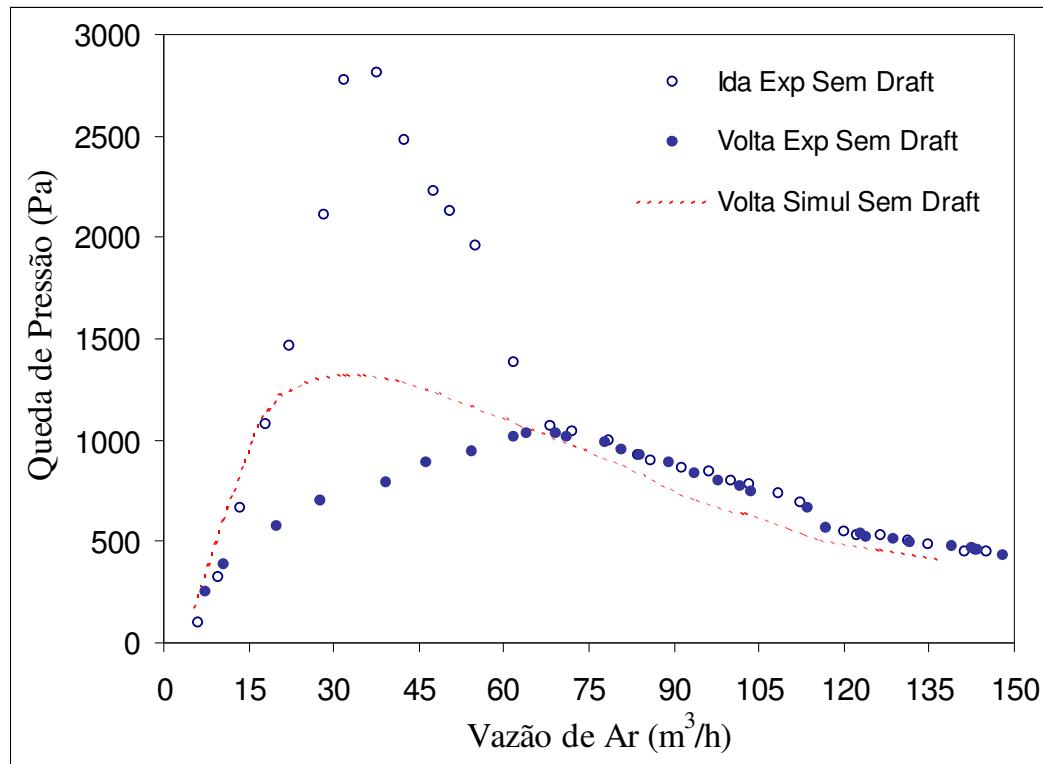


Figura 4.14 - Curvas características experimental e simulada para o leito de jorro sem *draft*.

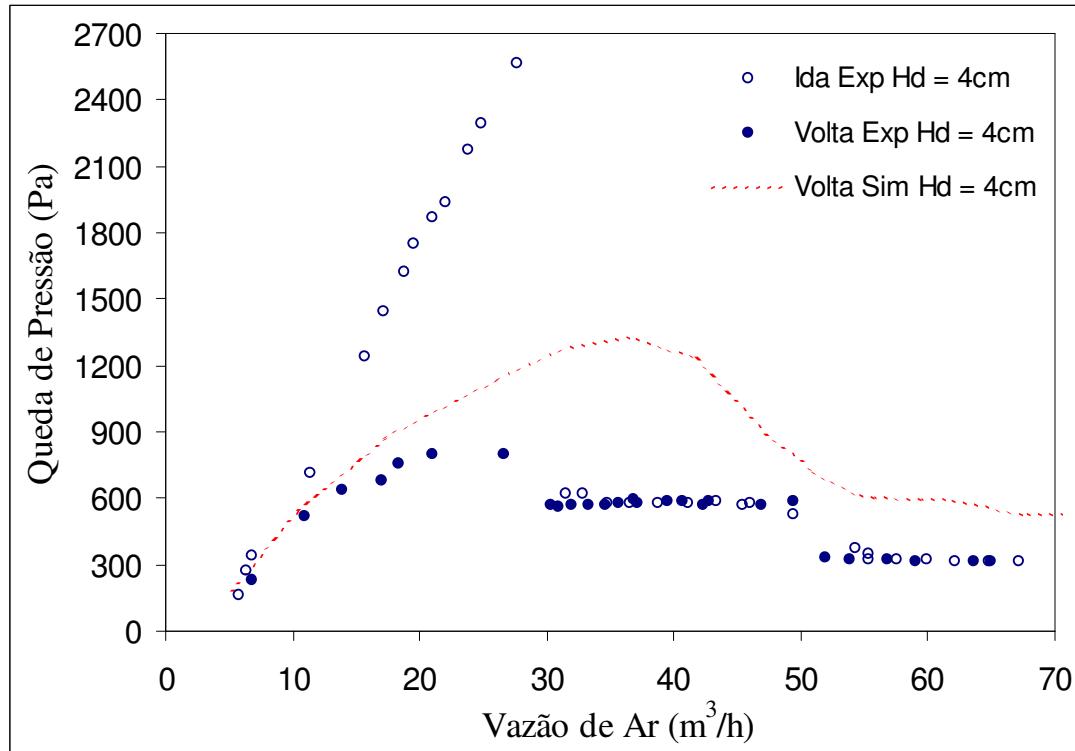


Figura 4.15 - Curvas características experimental e simulada do leito com *draft* ($H_d = 4\text{cm}$).

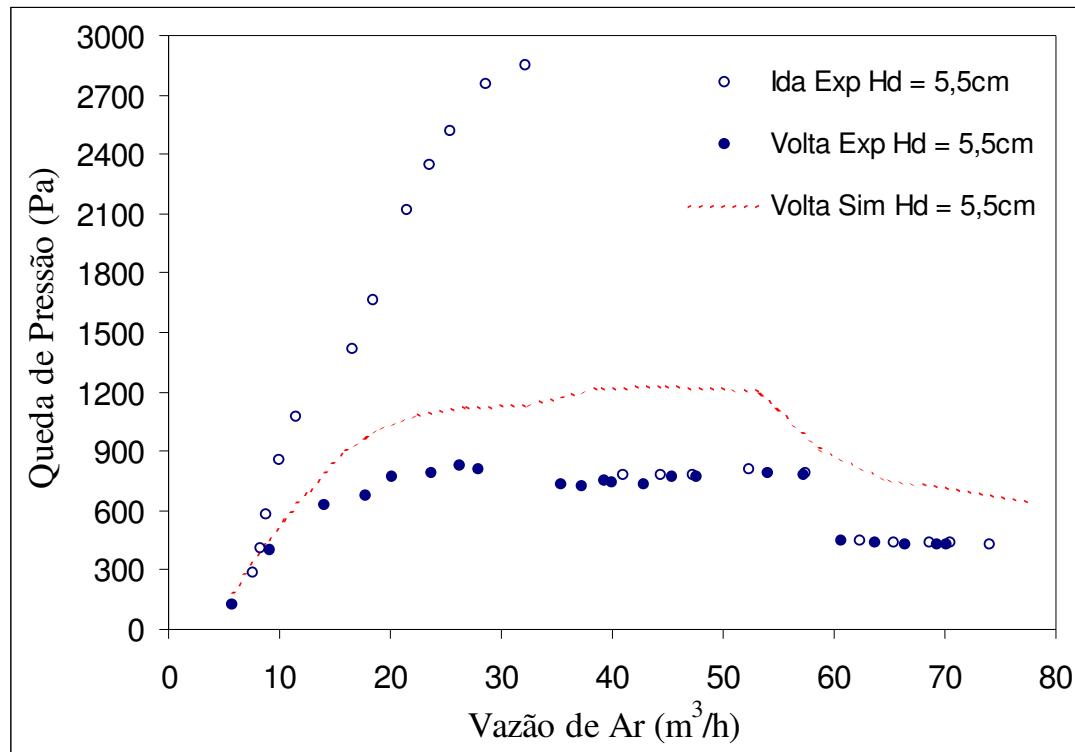


Figura 4.16 - Curvas características experimental e simulada do leito com *draft* ($H_d = 5,5\text{cm}$).

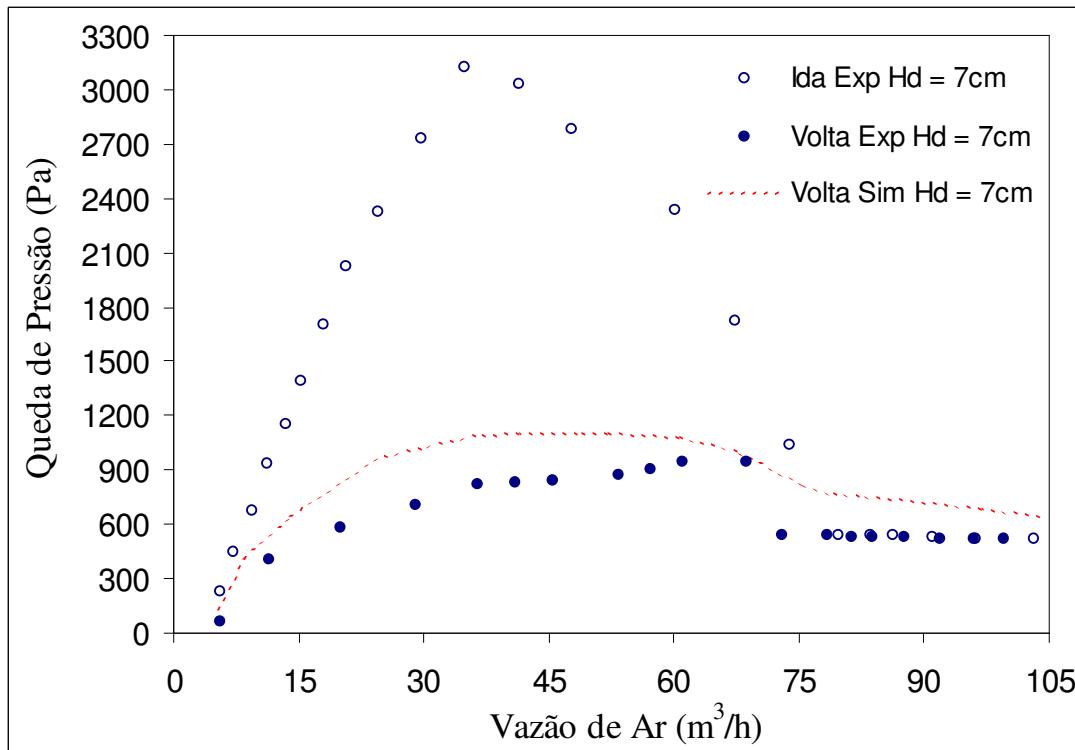


Figura 4.17 - Curvas características experimental e simulada do leito com *draft* ($H_d = 7\text{cm}$).

Além disto, observou-se também nas Figuras 4.14 a 4.17 acima que existe uma maior aproximação entre as curvas simuladas e os dados experimentais para maiores vazões de ar. Isto pode ser justificado pelo fato de que nas simulações considera-se o efeito do parâmetro temperatura granular, que considera a flutuação de velocidade devido aos choques entre as partículas e, além disto, para vazões mais altas as três regiões do leito ficam mais bem definidas, apresentando três regimes de escoamento com faixas de porosidade distintas.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam resultados de vazão de ar de jorro e queda de pressão experimentais e simuladas na condição de jorro mínimo. Nesta Tabela são apresentados os resultados para uma altura de leito estático (He) de 19 cm, nas configurações estudadas, ou seja, leito de jorro convencional (sem *draft*) e com tubos internos (*draft*) situados à distância da base (Hd) de 4; 5,5 e 7 cm, respectivamente. Nota-se que à medida que se aumenta a distância do tubo *draft* à base (Hd), menor é o erro relativo entre os valores experimentais e simulados de vazão de ar e de queda de pressão. As condições de jorro mínimo simuladas foram obtidas a partir das curvas características e dos perfis simulados de fração de volume dos sólidos que serão apresentados no tópico 4.3.2 a seguir.

Tabela 4.3 - Valores de vazão de jorro mínimo experimental e simulada para $He = 19\text{cm}$.

	Vazão Exp. (m^3/h)	Vazão Sim. (m^3/h)	Desvio Relativo (%)
Sem Draft	118,3	120,6	1,9
$Hd = 4\text{cm}$	49,4	50,7	2,7
$Hd = 5,5\text{cm}$	57,2	58,6	2,4
$Hd = 7\text{cm}$	68,6	67,5	1,5

Tabela 4.4 - Queda de pressão experimental e simulada no jorro mínimo para $He = 19\text{cm}$.

	ΔP Exp. (Pa)	ΔP Sim. (Pa)	Desvio Relativo (%)
Sem Draft	668,2	618,7	7,4
$Hd = 4\text{cm}$	587,3	727,3	23,8
$Hd = 5,5\text{cm}$	778,8	911,8	17,1
$Hd = 7\text{cm}$	947,3	1005,9	6,2

No Anexo 2 são apresentados os valores de vazão de ar e de queda de pressão na condição de mínimo jorro experimentais e simuladas para cada distância do *draft* à base (Hd) nas condições de altura de leito estático (He) de 16 e 22 cm, respectivamente. Neste Anexo são apresentadas também as curvas características de queda de pressão em função da vazão de ar de jorro referentes a estas condições.

4.3.2. Perfis Simulados de Fração de Volume de Sólidos para as Configurações: Convencional e Com *Draft*

As Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam os perfis simulados da fração de volume de sólidos para o leito convencional e para os leitos de jorro com *draft*, considerando as distâncias do tubo à base (H_d) de 4; 5,5 e 7 cm, respectivamente. Para as condições de vazão (Q) igual ou superior à de jorro mínimo (Q_{JM}), pode-se distinguir as três diferentes regiões do leito de jorro: região anular, região de jorro e fonte. Observa-se através dos perfis simulados de fração de volume de sólidos que a inserção do tubo *draft* promove uma nítida separação entre a região anular e a região de jorro, alterando os perfis de porosidade e de velocidade da partícula próximos à região de interface jorro-anular, o que será descrito mais detalhadamente nos tópicos 4.3.3 e 4.3.4 a seguir. Nota-se que na região anular a fração de sólidos é praticamente constante. Os perfis de fração de volume de sólidos simulados para alturas de leito estático (He) de 16 e 22 cm são apresentados no Anexo 3.

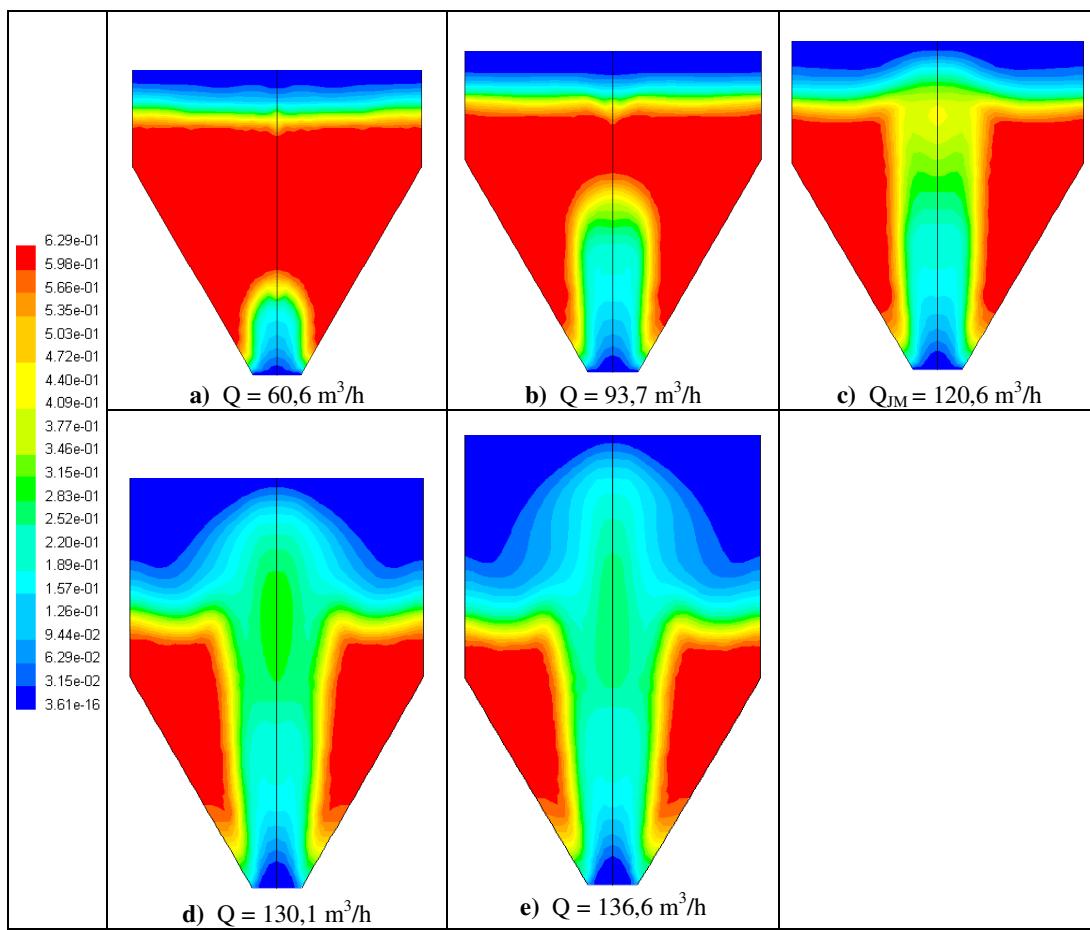
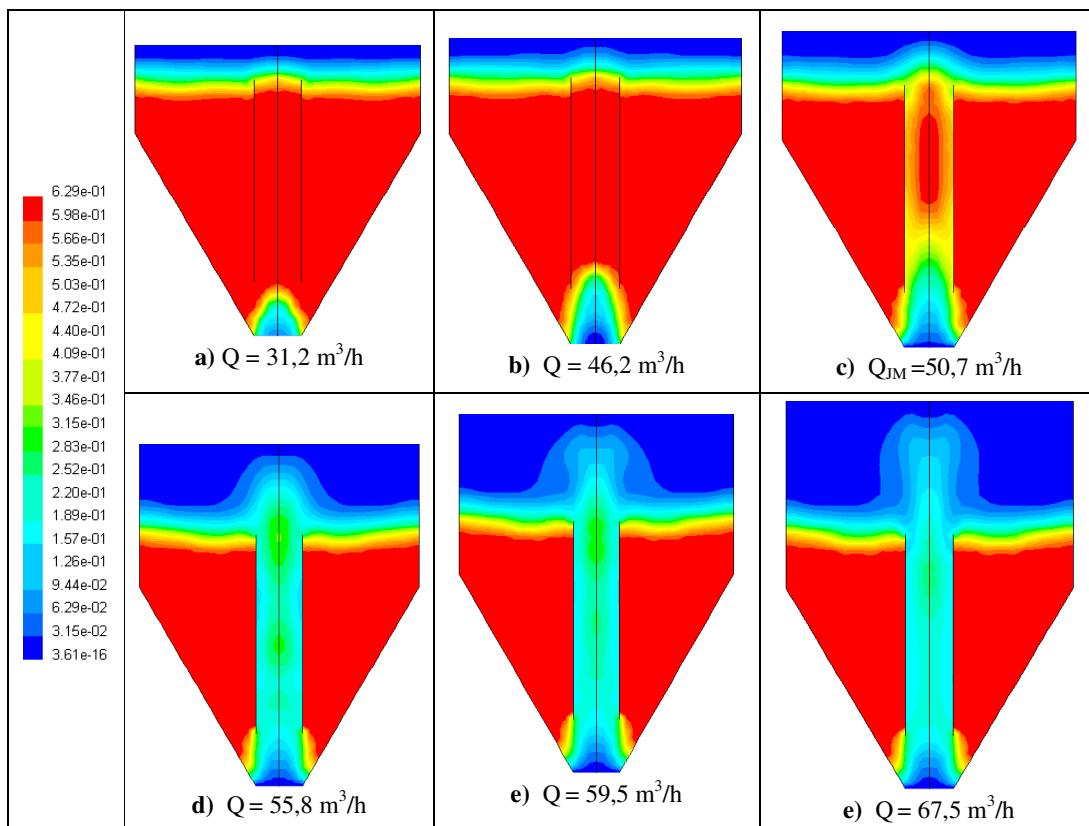
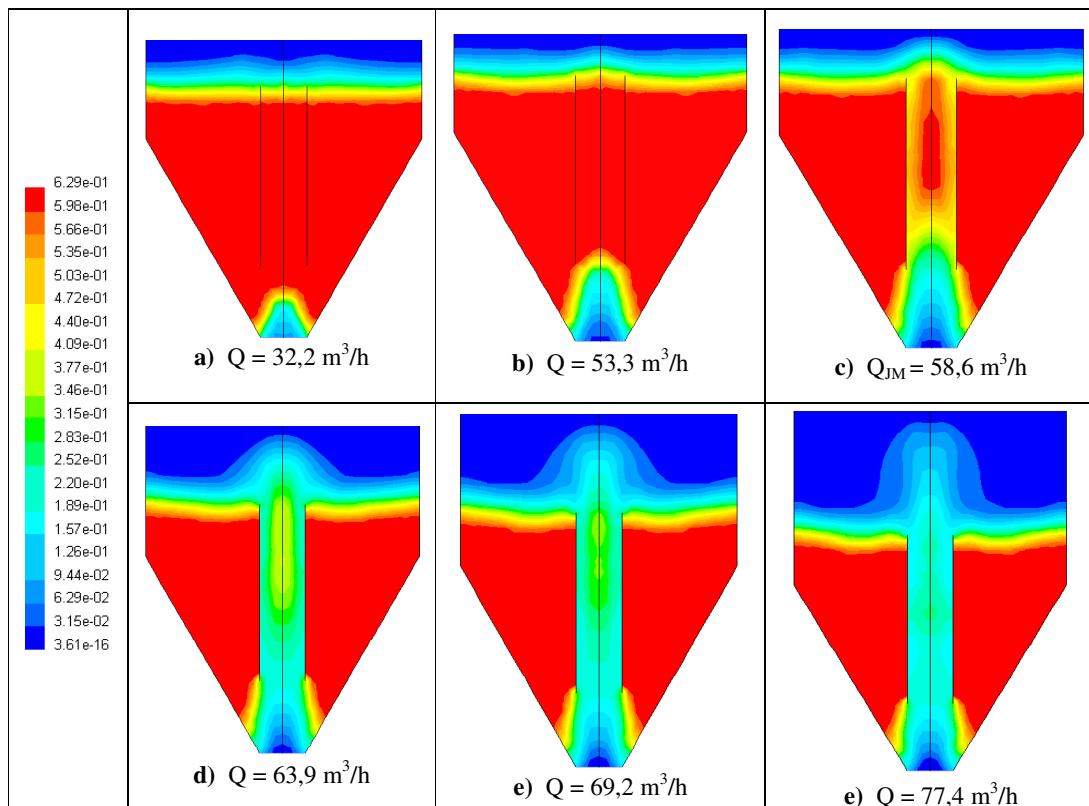


Figura 4.18 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro convencional (Sem *Draft*).

Figura 4.19 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com *draft* ($H_d = 4 \text{ cm}$).Figura 4.20 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com *draft* ($H_d = 5,5 \text{ cm}$).

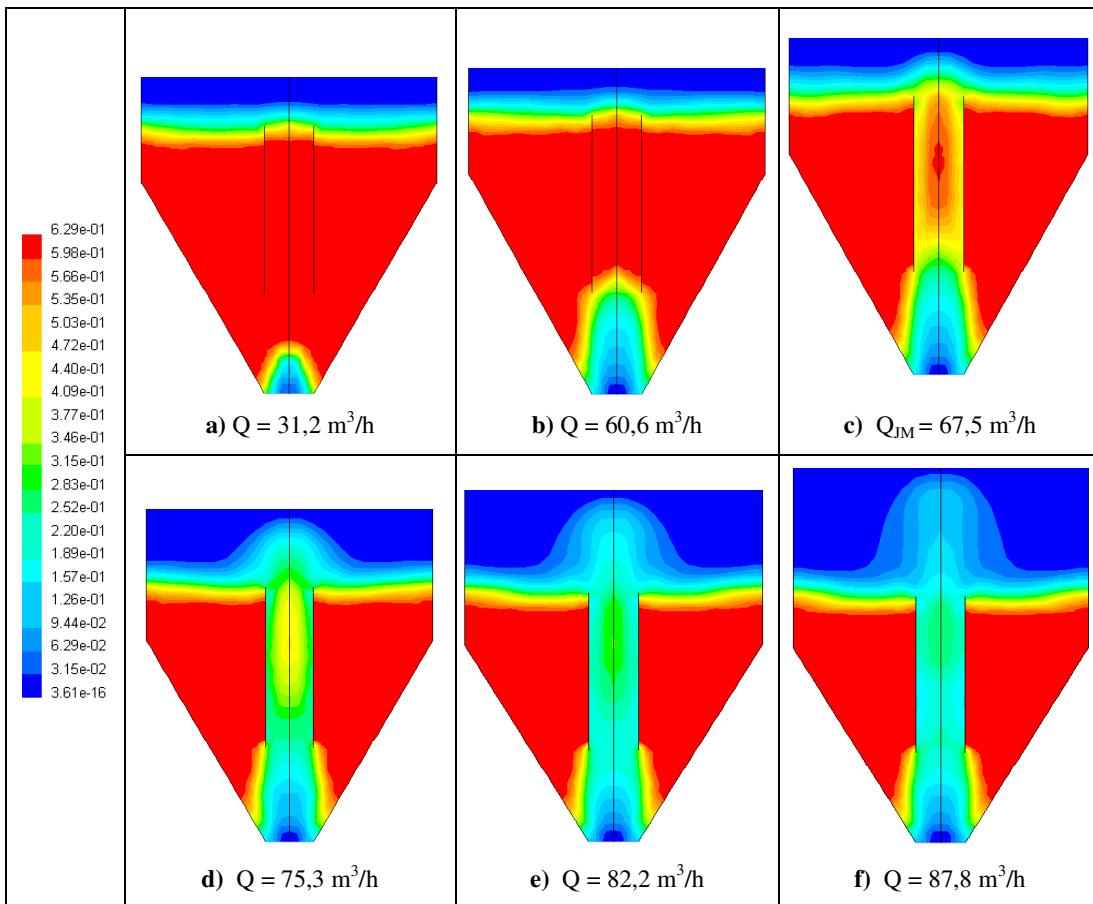


Figura 4.21 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro com *draft* ($H_d = 7 \text{ cm}$).

4.3.3. Perfis Axiais Simulados de Porosidade Para as Configurações: Convencional (sem tubo) e Com Tubo *Draft*

Os resultados simulados para os perfis radiais de porosidade em diferentes posições axiais (h) do leito são apresentados nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25, para os leitos de jorro convencional e com tubos *draft* situados a distância da base (H_d) de 4; 5,5 e 7 cm, respectivamente. Estes perfis foram obtidos à uma vazão de ar 20% maior que o jorro mínimo experimental ($Q=1,2Q_{JM}^{exp}$) e altura de leito estático (H_e) de 19cm. Os demais perfis simulados para alturas de leito estático (H_e) de 16 e 22 cm são apresentados no Anexo 4.

Os dados simulados na Figuras 4.22 referem-se à posições radiais equivalentes à região de jorro, interface jorro-anular, e inicio da região anular para o leito convencional, já para as Figuras 4.23 a 4.25 referem-se à região de jorro nas configurações com *draft*. Verificou-se nos resultados simulados de porosidade do leito de jorro convencional apresentados na Figura 4.22, que para uma determinada posição axial, existe uma região de porosidade aproximadamente constante (região de jorro) e em seguida uma forte diminuição

da porosidade na interface jorro-anular, e depois há uma tendência da porosidade atingir o valor de 0,37, que corresponde ao valor para a região anular. Na região de jorro, um aumento na altura provoca um aumento na concentração de partículas.

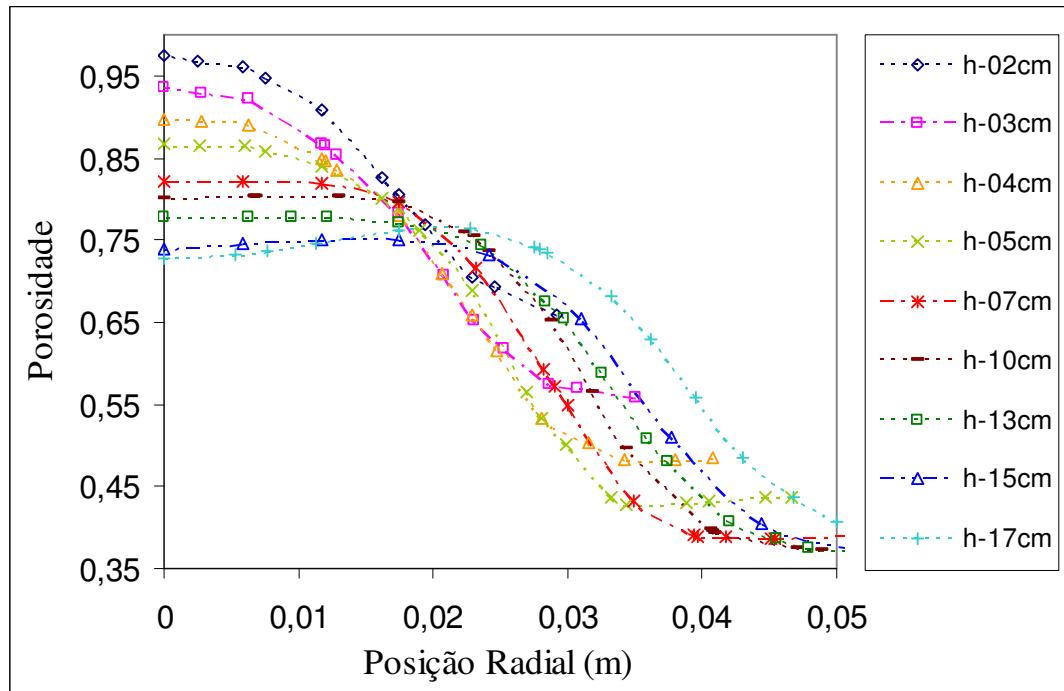


Figura 4.22 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais do leito de jorro convencional. ($Q_{1,2JM} \text{ exp} = 136,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 19 \text{ cm}$ e Sem Draft).

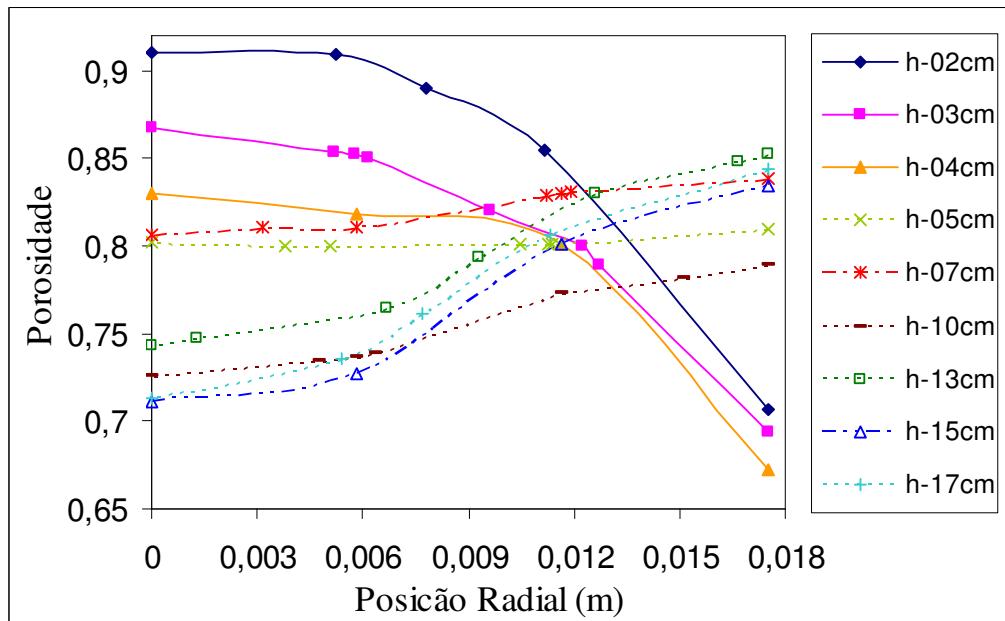


Figura 4.23 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais. ($Q_{1,2JM} \text{ exp} = 59,51 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 19 \text{ cm}$ e $Hd = 4 \text{ cm}$).

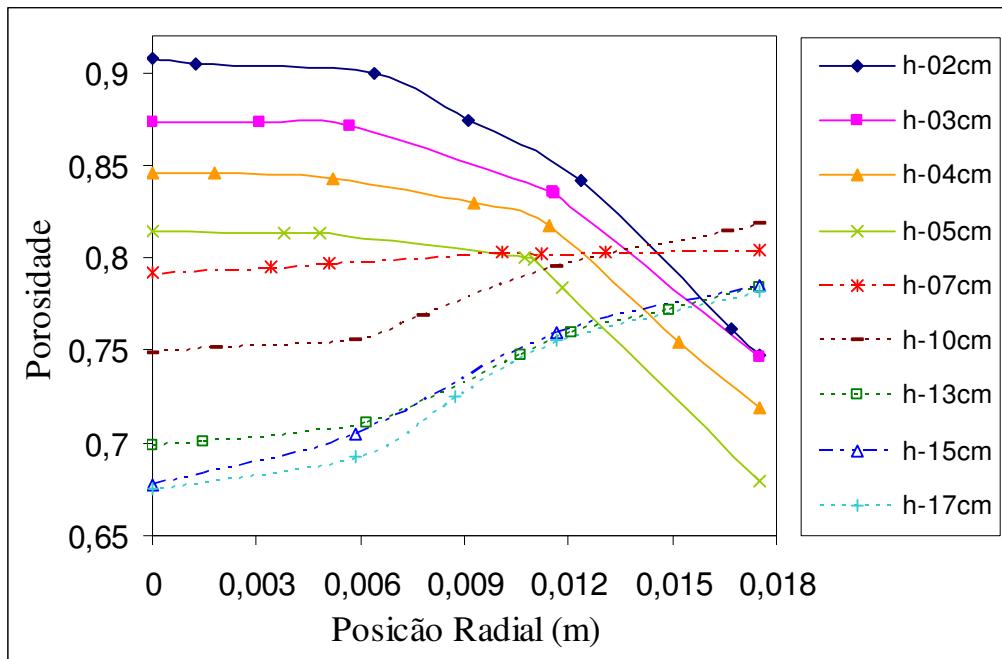


Figura 4.24 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2JM}^{\exp} = 69,25 \text{ m}^3/\text{h}, He = 19 \text{ cm e } Hd = 5,5 \text{ cm})$.

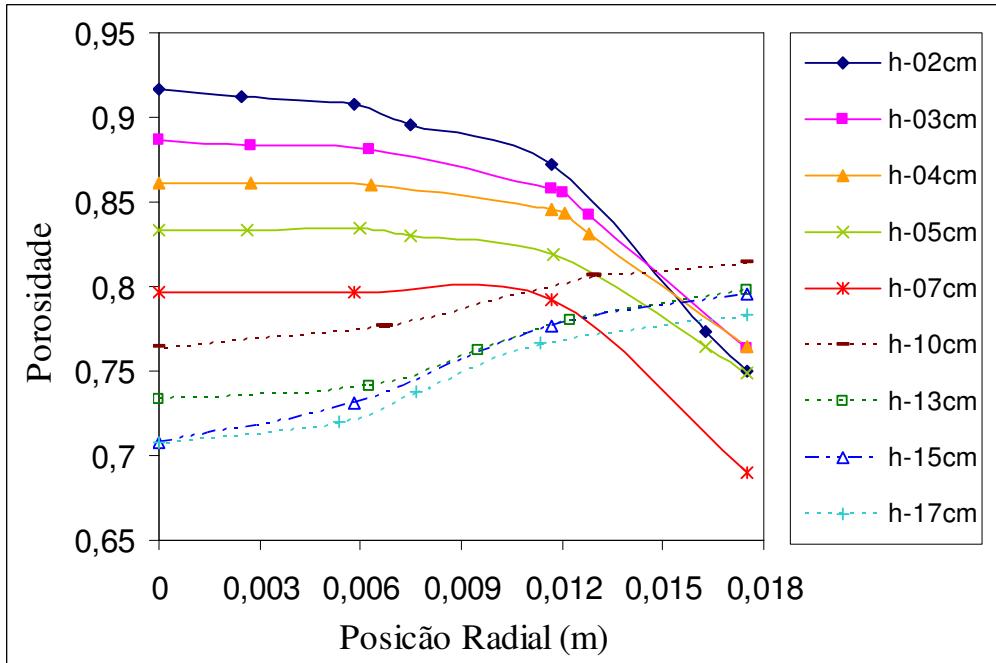


Figura 4.25 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axais.
 $(Q_{1,2JM}^{\exp} = 82,22 \text{ m}^3/\text{h}, He = 19 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.

Observa-se comparando os resultados das Figuras 4.23 a 4.25 com a Figura 4.22, que o comportamento do perfil de porosidade é distinto para o leito convencional e as configurações com *draft*. Além das diferenças quantitativas, para as configurações com tubo

draft ocorre um comportamento diferenciado para posições axiais maiores e menores que Hd . Antes do *draft* ($h < Hd$), o comportamento é qualitativamente similar ao do convencional, no entanto, para posições axiais maiores que Hd (região interna do *draft*) ocorre um aumento na porosidade em posições radiais próximo à parede do *draft* (posição radial igual a 0,0175 m), ou seja, um comportamento inverso ao do convencional nessa região.

4.3.4. Perfis Axiais Simulados de Velocidade da Partícula Sem e Com Tubo *Draft*

Os resultados de simulação obtidos para os perfis radiais de velocidade da soja, em diferentes posições axiais (h) do leito, são apresentados nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 para os leitos de jorro convencional e com tubos *draft* situados à distância (Hd) de 4; 5,5 e 7cm, respectivamente. Os perfis foram obtidos à uma vazão 20% maior que a de jorro mínimo experimental ($Q=1,2Q_{JM}^{exp}$) e para uma altura de leito estático (He) de 19 cm. Os demais perfis simulados das alturas de leito estático (He) de 16 e 22 cm são apresentados no Anexo 4.

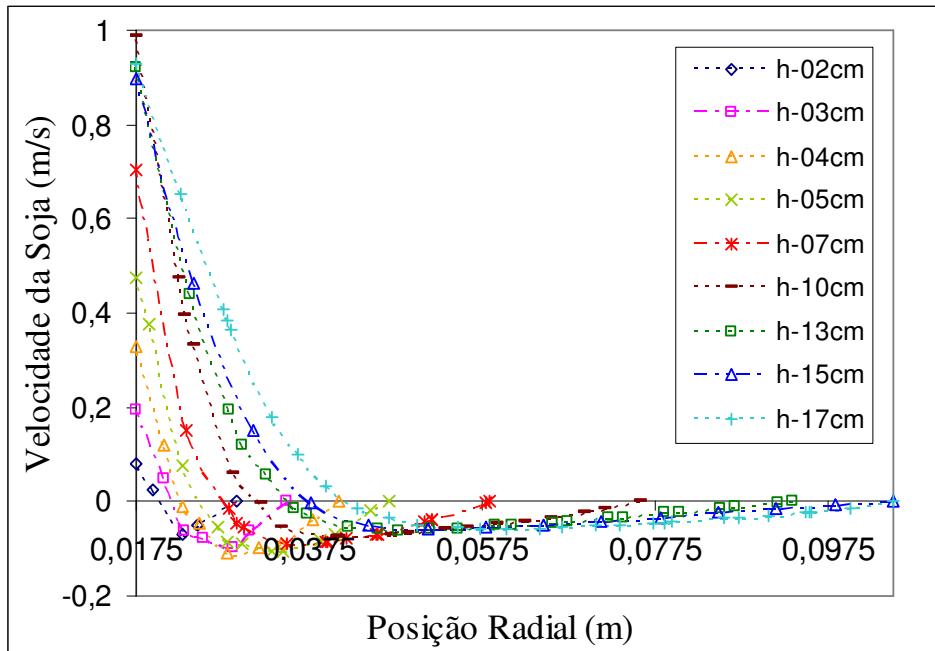


Figura 4.26 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais do leito de jorro convencional. ($Q_{1,2JM}^{exp} = 136,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 19 \text{ cm}$ e Sem *Draft*).

Na Figura 4.26, referente ao leito de jorro convencional, encontram-se resultados de velocidade da soja em posições radiais desde a interface jorro-anular até a região anular. Observa-se nesta figura que, na interface jorro-anular em todas as posições axiais, ocorrem velocidades positivas da partícula, indicando um arraste das mesmas pelo ar de jorro (fenômeno conhecido como curto-círcuito). Já na região anular, propriamente dita, as

partículas possuem um perfil de velocidade parabólico e negativo (movimento descendente). Este resultado é coerente com dados reportados na literatura (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

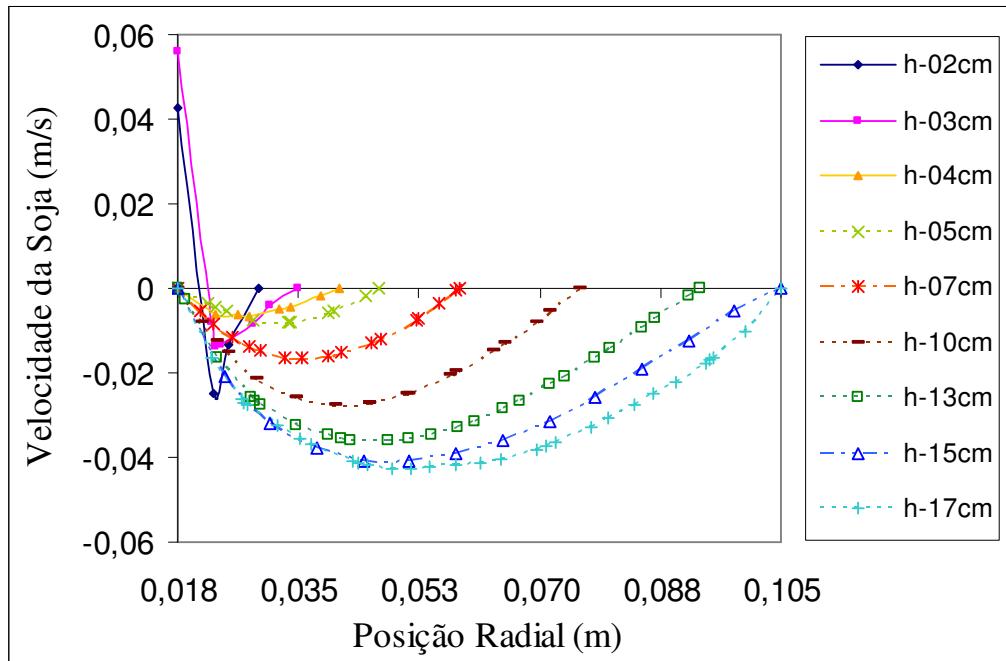


Figura 4.27 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2JM}^{exp} = 59,51 \text{ m}^3/\text{h}, He = 19 \text{ cm e } Hd = 4 \text{ cm})$.

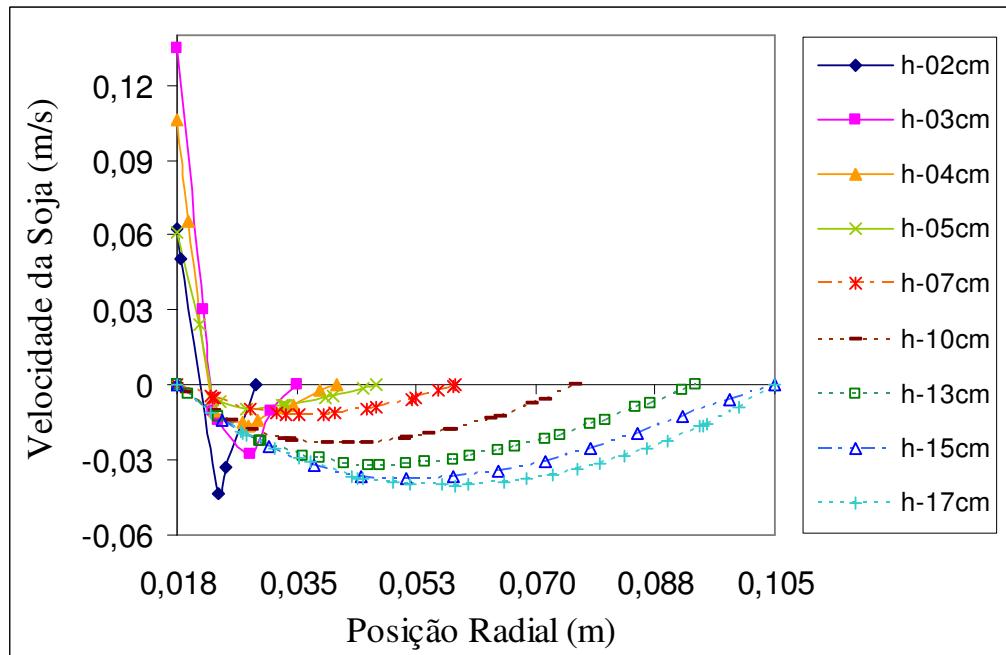


Figura 4.28 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2JM}^{exp} = 69,25 \text{ m}^3/\text{h}, He = 19 \text{ cm e } Hd = 5,5 \text{ cm})$.

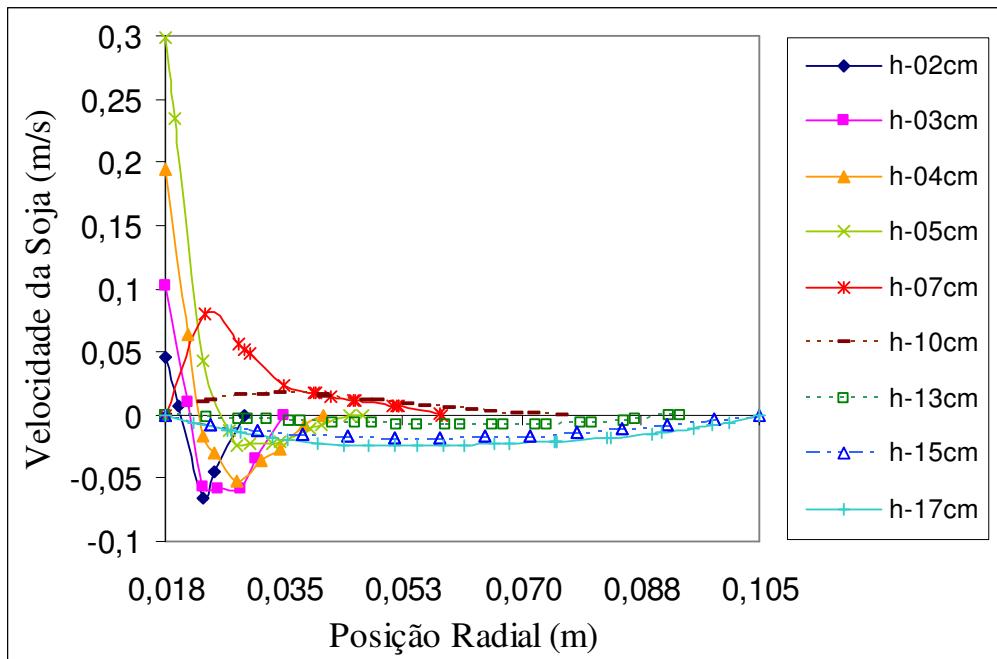


Figura 4.29 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2JM}^{exp} = 82,22 \text{ m}^3/\text{h}, He = 19 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.

As Figuras 4.27 a 4.29 mostram que, para posições axiais maiores que a distância do tubo *draft* à base ($h > Hd$), a região anular apresenta um comportamento da velocidade da soja tipicamente parabólico e negativo (movimento descendente), percorrendo toda extensão da região anular. Este fato é explicado pela presença do tubo *draft* separando a região anular da região de jorro impedindo que as partículas sejam arrastadas pelo ar de jorro na região da interface jorro-anular antes de chegarem à base. Já nas posições axiais (h) abaixo de Hd há um comportamento similar ao leito convencional (sem *draft*), onde o valor positivo de velocidade indica o arraste das partículas pelo ar de jorro. Observa-se que, quanto maior a distância do *draft* à base (Hd), maior é o arraste das partículas pelo ar.

4.3.5. Perfis Simulados de Fração de Volume de Sólidos e de Velocidade do Ar Para uma Mesma Vazão de Fluido na Alimentação

Na Figura 4.30 a seguir são apresentados os resultados dos perfis simulados de fração de volume de sólidos para as três configurações do leito de jorro com *draft* analisadas. Estas simulações foram realizadas com a mesma vazão de ar ($Q=74,5 \text{ m}^3/\text{h}$) e com uma mesma altura de leito estático ($He= 19\text{cm}$). Observa-se nesta figura que para a mesma vazão de ar a altura da fonte aumenta com a diminuição da distância do tubo à base (Hd), evidenciando a maior canalização do ar na região de jorro para Hd 's menores.

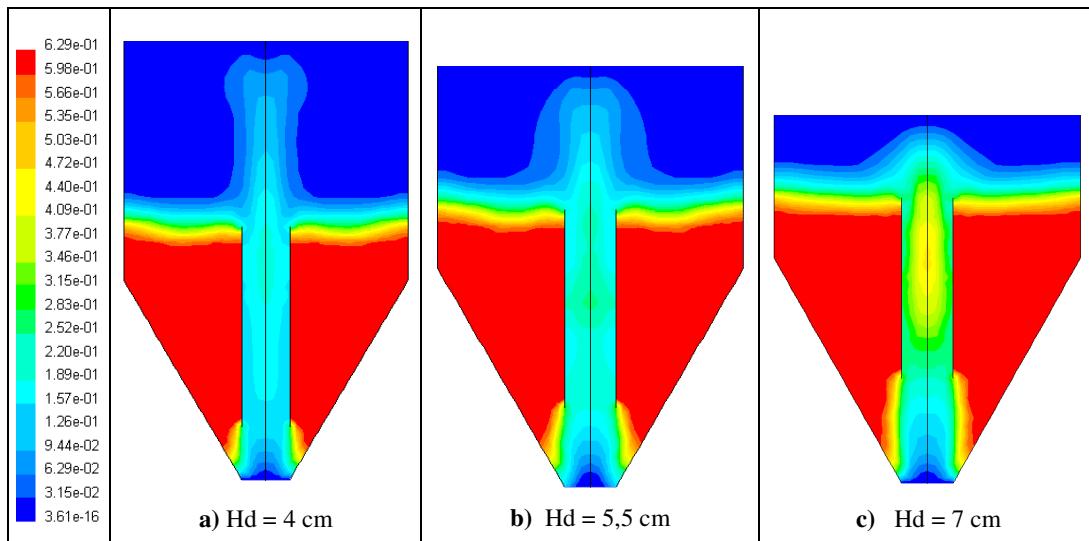


Figura 4.30 - Perfis de fração de volume de sólidos à uma vazão de $74,5\text{ m}^3/\text{h}$ e $He=19\text{cm}$.

As Figuras 4.31 a 4.33 a seguir apresentam os resultados dos perfis radiais de velocidade do ar na região de jorro (a) e na região anular (b) para o leito de jorro com *draft*, nas três distâncias H_d consideradas. As simulações foram realizadas com a mesma vazão de ar ($Q=74,5\text{ m}^3/\text{h}$) e com uma mesma altura de leito estático ($He=19\text{cm}$). Por meio dessas simulações é possível identificar a influência da distância do tubo à base na distribuição do ar nas regiões anular e de jorro para uma condição de idêntica vazão de ar na alimentação. As distâncias axiais (h) escolhidas foram aquelas que nas três configurações existe a separação das 2 regiões pelo tubo *draft*.

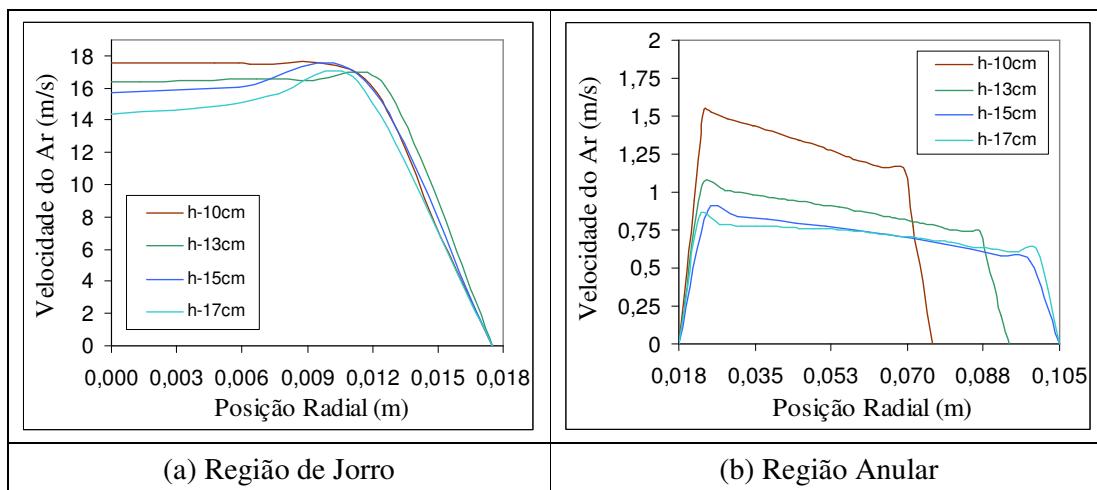
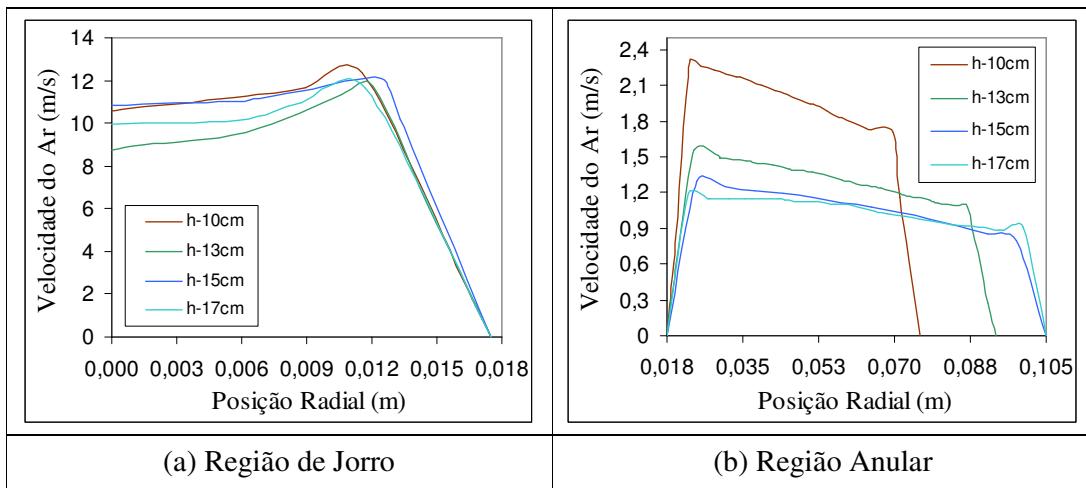
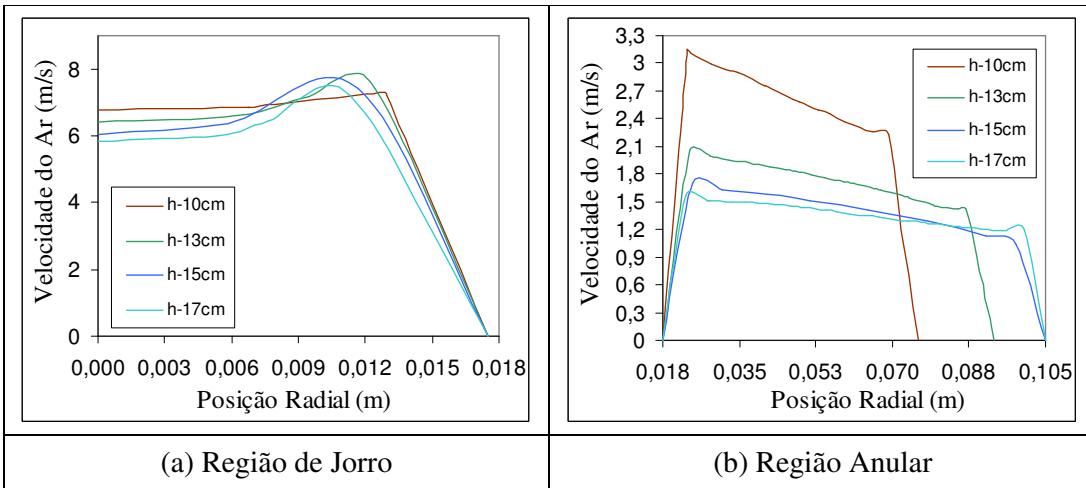


Figura 4.31 - Distribuição radial simulado de velocidade do ar ($H_d = 4\text{ cm}$).

Figura 4.32 - Distribuição radial simulado de velocidade do ar ($H_d = 5,5$ cm).Figura 4.33 - Distribuição radial simulado de velocidade do ar ($H_d = 7$ cm).

As Figuras 4.31 (a) a 4.33 (a), onde são apresentados os perfis radiais de velocidade do ar na região de jorro, mostram que ocorreu um expressivo decréscimo da velocidade do fluido na região de jorro com a elevação do tubo. Esta menor velocidade no jorro, ocorre pelo aumento da percentagem do ar que passa na região anular quando H_d é elevado. Este fato pode ser visualizado na parte (b) dessas figuras, onde fica claro o aumento da velocidade do ar na região anular quando se incrementa H_d .

As diferenças na fluidodinâmica do leito de jorro acarretadas pela presença do tubo *draft*, bem como pela influência da distância do tubo à base (H_d), podem afetar significativamente diversas aplicações deste equipamento. Por exemplo, no caso de aplicação do leito de jorro para revestimento de partículas, para a condição do *draft* mais próximo a base do leito há uma menor passagem do ar para a região anular o que pode prejudicar a secagem das partículas recobertas que estão percorrendo a região anular. Já para *draft* mais

distante da base há uma maior passagem do ar para a região anular, porém, há uma maior recirculação das partículas abaixo do *draft* (curto-circuito) o que pode ser prejudicial para a homogeneidade do produto obtido. Portanto, é necessário um cuidado especial na hora de decidir qual a distância do tubo à base (H_d) que fornece a melhor condição para cada aplicação do leito de jorro.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados estudos experimentais e de simulação numérica por meio da técnica de CFD, utilizando um Modelo Granular Euleriano Multifásico para descrever o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro com e sem a presença do tubo *draft*. Inicialmente foi realizada uma comparação entre três modelos de arraste conhecidos na literatura: GIDASPOW *et al.* (1992), SYAMLAL e O'BRIEN (1989) e WEN e YU (1966). As curvas características de queda de pressão, em função da vazão de ar, simuladas pelos três modelos de arraste apresentaram boas concordâncias qualitativas e quantitativas com os dados experimentais. Identificaram-se diferenças significativas entre os perfis simulados de porosidade e de velocidade da partícula para os diferentes modelos de arraste. O modelo que apresentou as melhores concordâncias com dados experimentais de vazão de ar e queda de pressão no jorro mínimo foi o de GIDASPOW *et al.* (1992), sendo, portanto, este o modelo escolhido para as posteriores simulações. Verificou-se também que o modelo de SYAMLAL e O'BRIEN (1989) subestimou o valor da vazão de jorro mínimo, enquanto que o modelo de WEN e YU (1966) o superestimou. As respectivas quedas de pressão simuladas foram superestimadas por ambos os modelos.

Posteriormente, foram realizados estudos experimentais e de simulação por meio da técnica de CFD, para diferentes configurações do leito de jorro: leito convencional (sem *draft*) e leitos com *draft* variando a altura de leito estático (He) em 16, 19 e 22 cm, e a distância do tubo *draft* à base (Hd) em 4; 5,5 e 7 cm. Através das simulações, foram obtidas boas previsões do comportamento fluidodinâmico do leito de jorro nas configurações analisadas, sendo que as curvas características simuladas mostraram boa concordância com os dados experimentais. As condições de jorro mínimo simuladas foram obtidas a partir das curvas características e dos perfis simulados de fração de volume dos sólidos.

Foram obtidos perfis simulados de porosidade e de velocidade da partícula a uma vazão de ar 20% superior a vazão de jorro mínimo experimental para cada configuração. Através destes perfis foi possível identificar as diferenças significativas no comportamento fluidodinâmico das configurações de leito de jorro convencional e com tudo *draft*.

Verificou-se nos resultados simulados de porosidade para o leito de jorro convencional (sem *draft*), que para uma determinada posição axial (*h*), existe uma região de

porosidade aproximadamente constante (região de jorro) e em seguida uma forte diminuição da porosidade na interface jorro-anular. Na região de jorro, um aumento na altura axial (h) provoca um aumento na concentração de partículas. Constatou-se que o comportamento do perfil de porosidade é distinto para o leito convencional e para as configurações com tubo *draft*. Além das diferenças quantitativas, para as configurações com tubo *draft* ocorre um comportamento diferenciado para posições axiais maiores e menores que Hd . Antes do *draft* ($h < Hd$), o comportamento é qualitativamente similar ao do convencional, entretanto, para posições axiais (h) maiores que Hd (região interna do *draft*) há um aumento na porosidade em posições radiais próximo à parede do *draft*, ou seja, um comportamento inverso ao do convencional nesta região.

Com relação aos resultados de velocidade das partículas verificou-se que para o leito de jorro convencional, em todas posições axiais da interface jorro-anular, ocorrem velocidades positivas da partícula, indicando um arraste das mesmas pelo ar de jorro (fenômeno conhecido como curto-circuito). Já na região anular, propriamente dita, as partículas possuem um perfil de velocidade parabólico e negativo (movimento descendente).

Para as configurações com *draft* os resultados simulados de velocidade das partículas mostram que, para posições axiais maiores que a distância do tubo *draft* à base ($h > Hd$), a região anular apresenta um comportamento da velocidade da soja tipicamente parabólico e negativo (movimento descendente), percorrendo toda extensão da região anular. Este fato é explicado pela presença do tubo *draft* separando a região anular da região de jorro impedindo que as partículas sejam arrastadas pelo ar de jorro na região da interface jorro-anular antes de chegarem à base. Já nas posições axiais abaixo de Hd há um comportamento similar ao leito convencional (sem *draft*), onde o valor positivo de velocidade na interface indica o arraste das partículas pelo ar de jorro. Observou-se também que, quanto maior a distância do *draft* à base (Hd), maior é o arraste das partículas pelo ar.

Além disto, foram analisadas simulações feitas com uma mesma vazão de ar ($Q=74,5 \text{ m}^3/\text{h}$) e uma mesma altura de leito estático ($He=19\text{cm}$) para as três distâncias do tubo à base (Hd). Constatou-se, através dos perfis de fração de volume de sólidos, que a altura da fonte aumenta com a diminuição da distância do *draft* à base (Hd), evidenciando assim, a maior canalização do ar na região de jorro para menor distância Hd . Por meio dos perfis radiais de velocidade do ar na região de jorro e região anular destas simulações, foi possível identificar a influência da distância do tubo à base (Hd) na distribuição do fluido nessas regiões para uma condição de idêntica vazão de ar na alimentação. Os perfis radiais de velocidade do ar na

região de jorro mostraram que ocorreu um expressivo decréscimo da velocidade do fluido na região de jorro com a elevação do tubo. Esta menor velocidade no jorro, ocorre pelo aumento da percentagem do ar que passa na região anular quando H_d é elevado. Este fato pode ser também visualizado nos perfis radiais para a região anular, onde fica claro o aumento da velocidade do ar na região anular quando se incrementa H_d .

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com relação aos futuros trabalhos sobre fluidodinâmica em leito de jorro, e considerando os resultados obtidos neste trabalho, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Realizar simulações considerando diferentes valores de empacotamento máximo ($\alpha_{s,\max}$) e coeficientes de restituição (e_{ss}), e verificar a influência destes parâmetros na fluidodinâmica do leito de jorro;
- Realizar simulações pela técnica de CFD para malhas tri-dimensionais.
- Realizar estudos experimentais e de simulação numérica para diferentes configurações não-convencionais do leito de jorro, tais como, leito de jorro com aeração complementar, leito de jorro cônico e leito com tubo *draft* poroso, dentre outros;
- Realizar estudos de aplicação do leito de jorro com tubo *draft*, como por exemplo, na extração de bixina a partir de sementes de urucum;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENKRID, A., CARAM, H.S., Solid flow in the annular region of a spouted bed, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 35, p.1328-1336, 1989.
- CASSANELLO, M., LARACHI, F., LEGROS, R., 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.
- CHAPMAN, S., COWLING, T.G., The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge University Press, Cambridge, England, 3rd edition, 1990.
- CLAFIN, J.K. e FANE, A.G.; Spouted with a porous draft tube. In: Anais do 2º Simpósio Internacional sobre Leito de Jorro, Canadá, 1982.
- DALLA VALLE, J.M. Micromeritics. Pitman, London, 1948.
- 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, Vol 61, p. 1401-1420, 2005.
- DUARTE, C.R., MURATA, V.V., BARRROZO, M.A.S., A study of the fluid dynamics of the spouted bed using CFD, Braz. J. Chem. Eng., Vol 22 (2), p.263-270, São Paulo, 2005.
- DUARTE, C.R., Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 220 p., 2006.
- DUTRA, C.H.M.C., Dinâmica do Leito de Jorro Não-Convencional, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 58p.,1984.
- 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.
- GARSIDE, J., AL-DIBOUNI, M.R., Velocity-Voidage Relationships for Fluidization and Sedimentation. I & EC Process Des. Dev., 16:206-214, 1977.
- GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., DING, J., Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization, In: Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, p. 75-82, 1992.
- HE, Y.L., LIM, C.J., GRACE, J.R., ZHU, J.X., Measurements of Voidage Profiles in Spouted Beds, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 72, p.229-234, 1994.
- ISHIKURA, T., NAGASHIMA, H., IDE, M., Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, Powder Technology, Vol. 131, p.56-65, 2003.

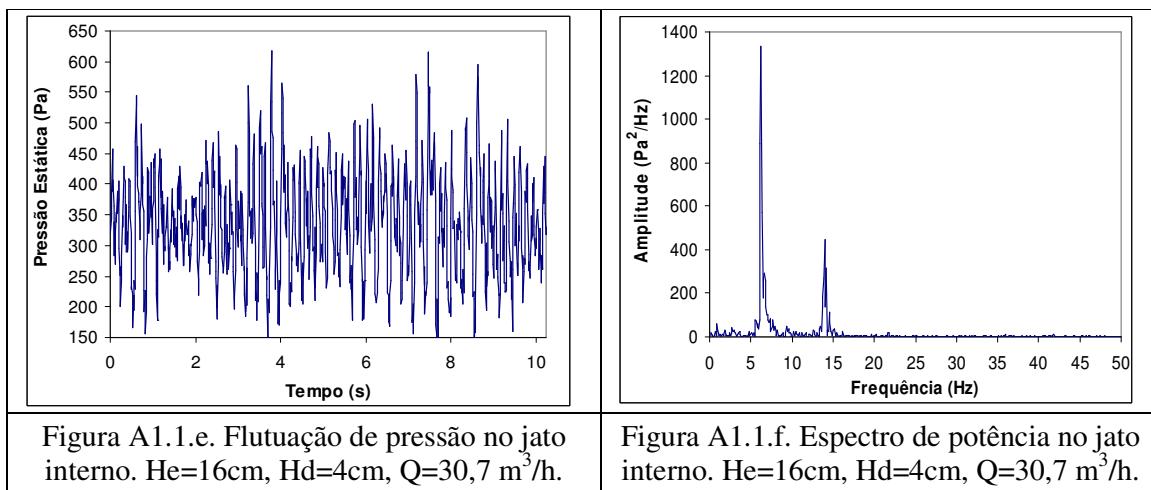
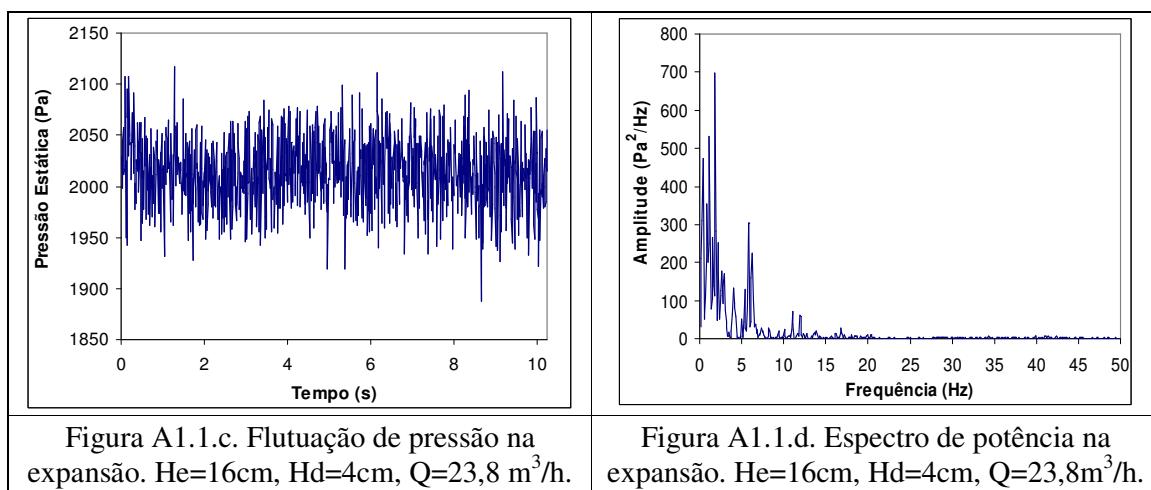
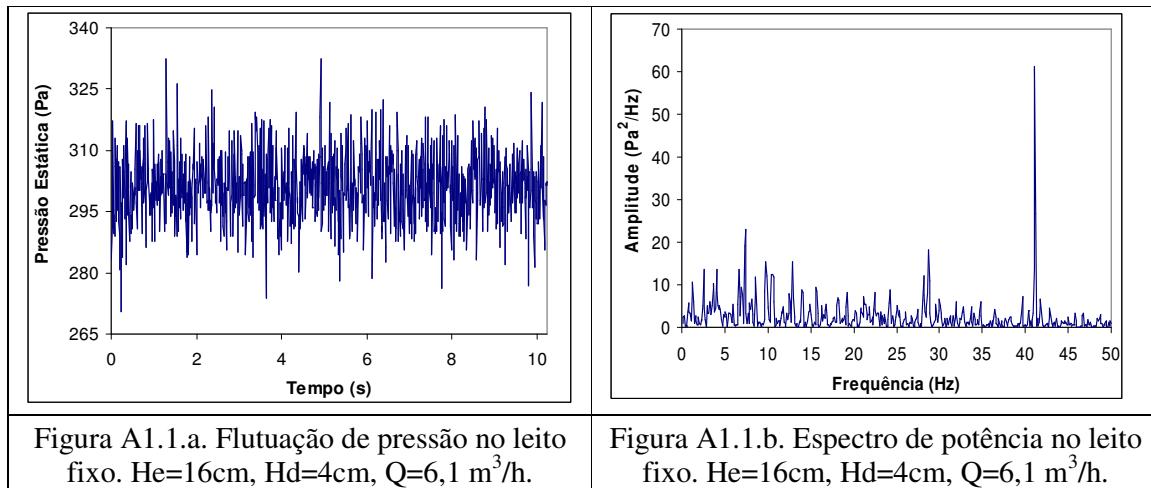
- KAWAGUCHI, T., TSUJI, T.T., Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method: comparison between the two-and-three-dimensional models, Powder Technology, Vol. 96, p.129-138, 1998.
- KAWAGUCHI, T., SAKAMOTO, M., TSUJI, T.T., Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, Powder Technology, Vol. 109, p.3-12, 2000.
- LADEIRA, J.F.M., 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., CHAOUKI, J., Mixing and circulation of solids in spouted beds, Chemical Engineering Science, Vol.10, p. 1-11, 2002.
- LEFROY, G. A., DAVIDSON, J.F., The mechanism of spouted beds, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 47, p.120-128, 1969.
- LOURENÇO, R.O., Identificação e Monitoramento de Regimes em Leito de Jorro Convencional, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 125 p., 2006.
- LUN, C.K.K., SAVAGE, S.B., JEFREY D.J., CHEPURNIY, N., Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field, J. Fluid Mech., 140:223-256, 1984.
- MALISKA, C.R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos, Coordenadas Generalizadas, LTC Editora, Brasil, 1995.
- MATHUR, K.B., EPSTEIN, N., Spouted Beds , Academic Press Inc. LTD., New York, 304p., 1974.
- MATHUR, K.B., GISHLER, N., A technique for contacting gases with coarse solid particles, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 1, p.157-164, 1955.
- OLAZAR, M., SAN JOSÉ, M.J., IZQUIERDO, M.A., SALAZAR, A.O., 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.
- ROY, D., LARACHI, F., LEGROS. R., CHAOUKI, J., A study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 72, p. 945-952, 1994.
- SCHAEFFER, D.G., Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow, J. Di, Eq., 66:19-50, 1987.
- SHIRVANIAN, P.A., CALO, J.M., G. HRADIL, Numerical simulation of fluid-particle hydrodynamics in a rectangular spouted vessel, International Journal of Multiphase Flow, 32, p.739-753, 2006.
- SHIRVANIAN, P.A., CALO, J.M., An experimental investigation of the hydrodynamics of a rectangular spouted vessel with draft duct, Chem. Eng. Journal, submitted for publication, 2006.

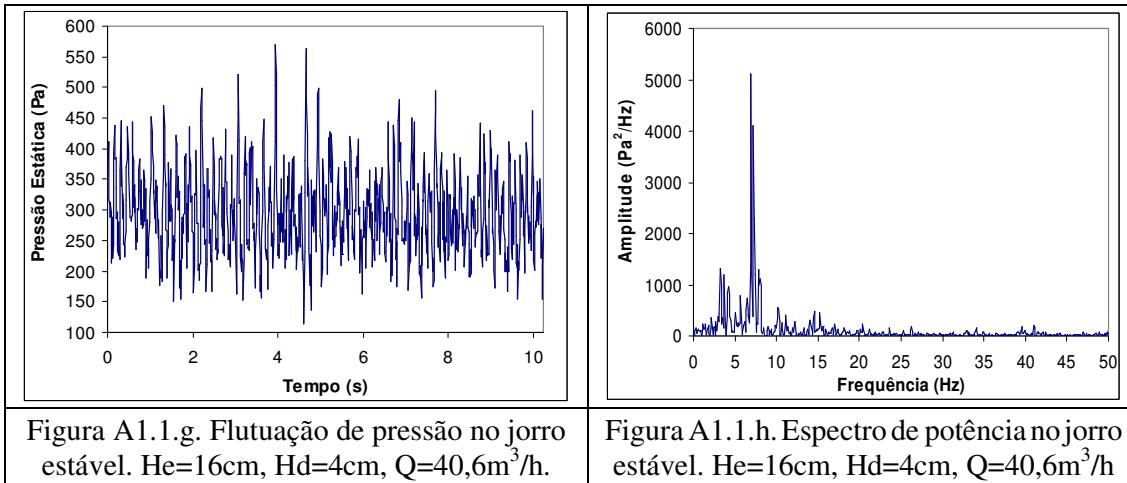
- SUCIU, G.C. e PATRASCU, M.H., Phase Distribution and Residence Time in a Spouted Bed, AICHE Journal, Vol 23. Nº3, p.312-318, 1977.
- SYAMLAL, M., ROGERS, W., O'BRIEN, T. J., MFIX documentation: Vol. 1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1993.
- SYAMLAL, M., O'BRIEN, T. J., Computer simulation of bubbles in a fluidized bed, AICHE Symp. Series, Vol. 85, p. 22-31, 1989.
- TARANTO, O. P. Monitoramento de regimes de recobrimento de partículas em leito de jorro bidimensional. Tese de Doutorado, Campinas, UNICAMP (1996).
- WEN, C.Y., YU, Y.H., Mechanics of fluidization, Chem. Eng. Prog. Symp.Series, Vol. 62, p. 100-111, 1966.
- XU, J., BAO, X., WEI, W., SHI, G., SHEN, S., BI, H. T., GRACE, C. J. LIM, C.J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds, Powder Technology, Vol. 140, p. 141-154, 2004.
- YOKOGAWA, A., MEISEN, A., JSME J., Vol. 36 (287), p.1117-1125, 1970. (in japanese)
- ZHONG, W., CHEN, X., ZHANG, M., Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed: Pressure drop and minimum spouting/spout-fluidizing velocity, Chem. Eng. Journal, Vol 118, p. 37-46, 2006, a.
- ZHONG, W., XIONG, Y., YUAN, Z., ZHANG, M., DEM Simulation of gas-solid flow behaviors in spout-fluid bed, Chem. Eng. Science, Vol 61, p. 1571-1584, 2006, b.

ANEXO 1

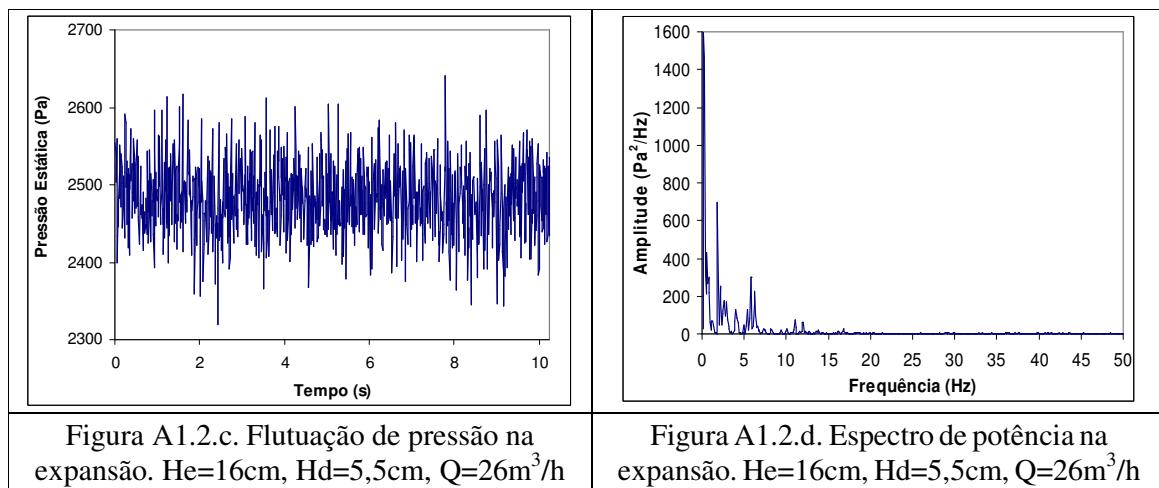
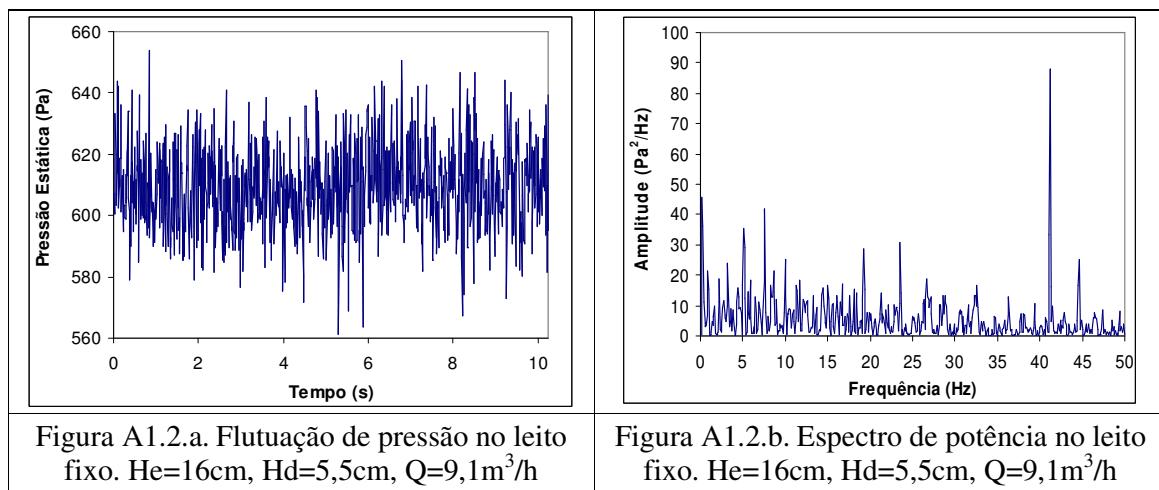
Flutuações de Pressão e Espectros de Potência Experimentais
Para as Demais Configurações de Leito de Jorro com Tubo *Draft*

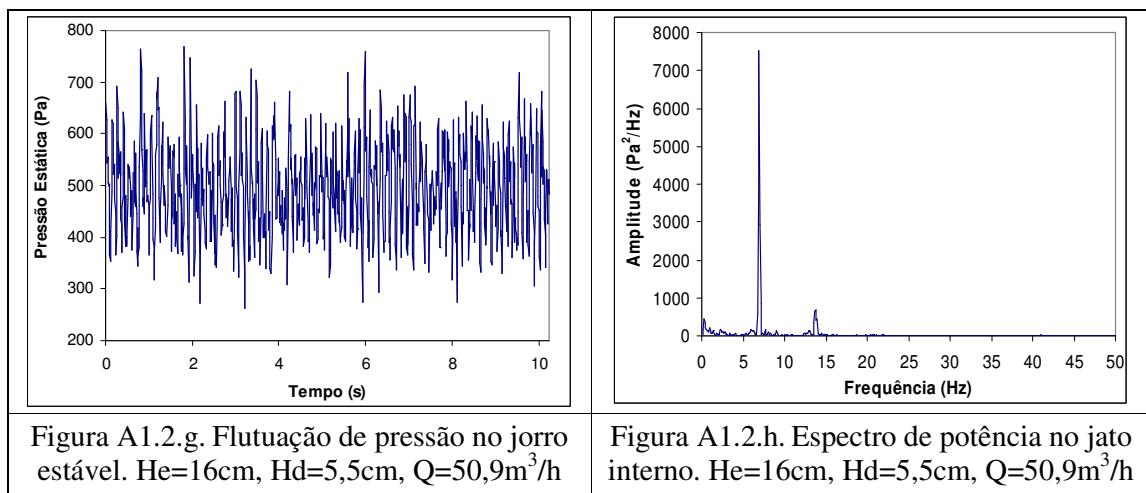
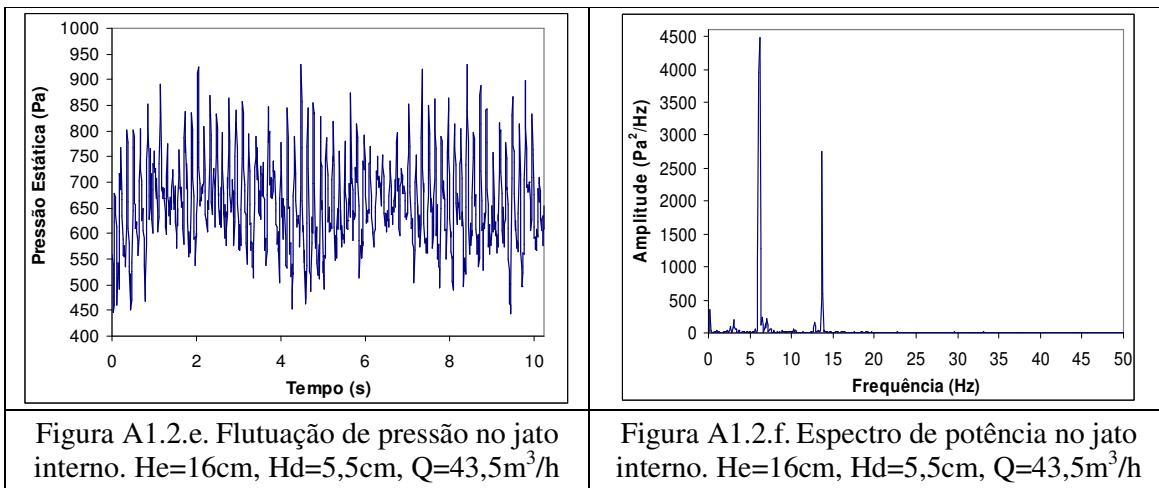
Altura de Leito Estático ($He = 16\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 4\text{cm}$):



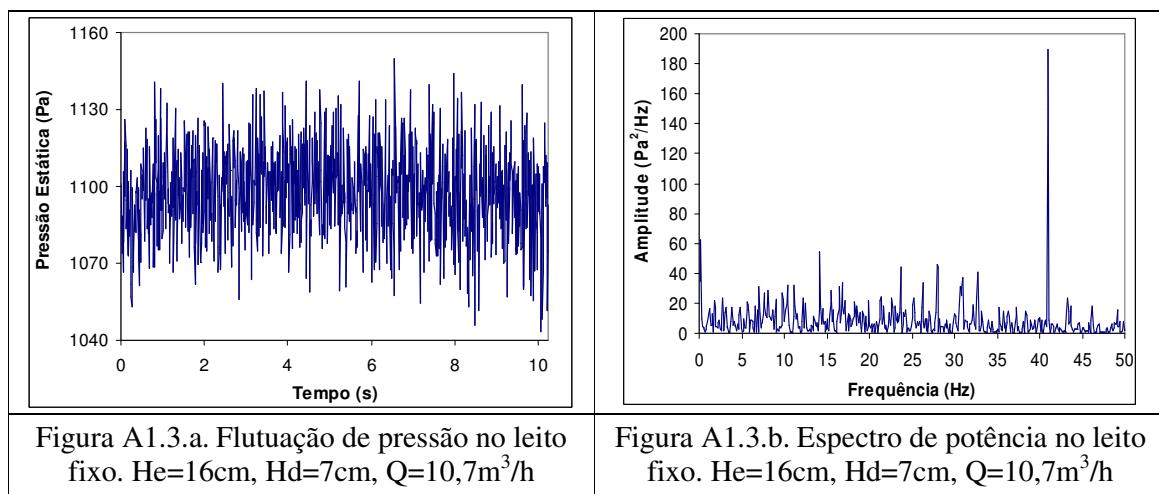


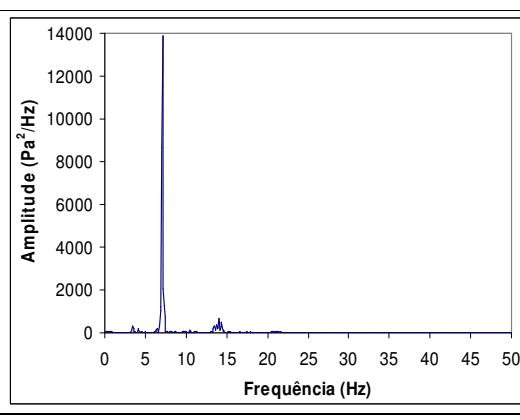
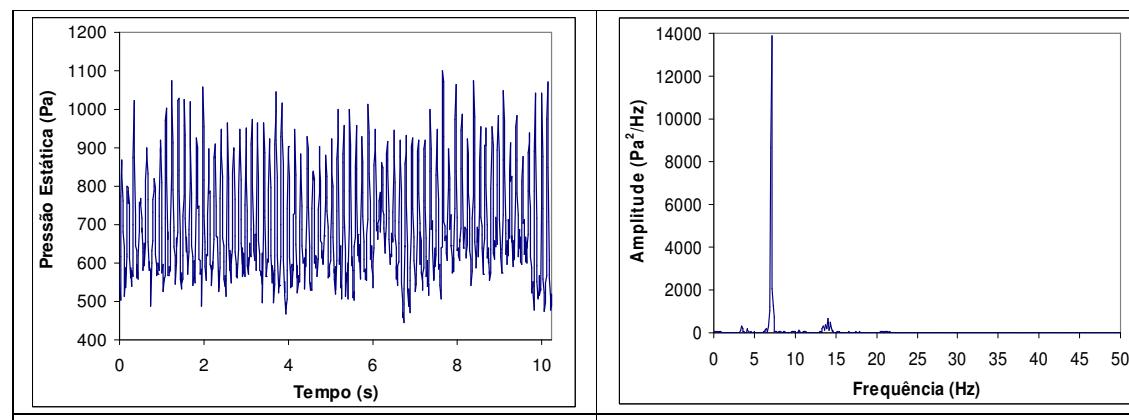
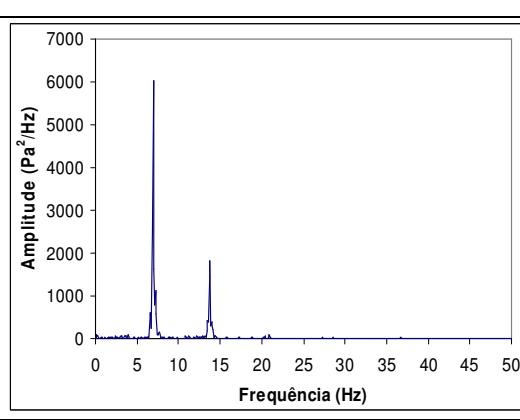
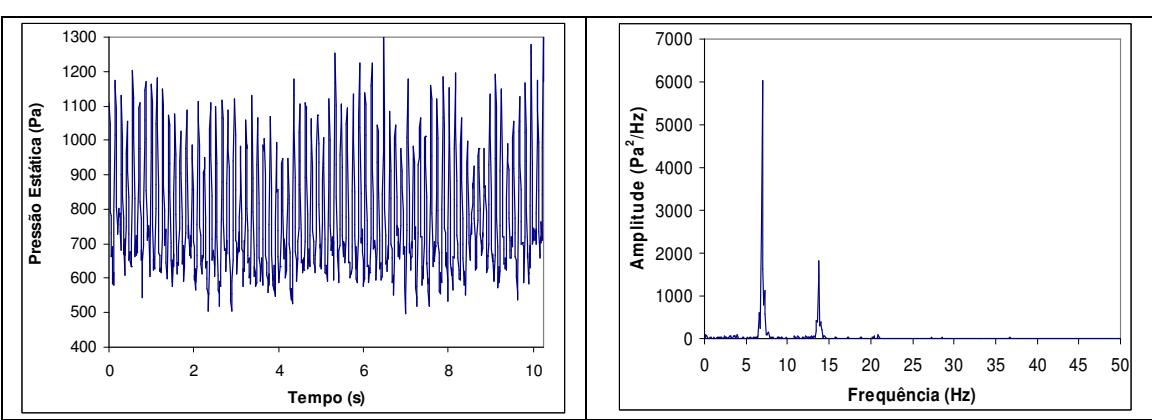
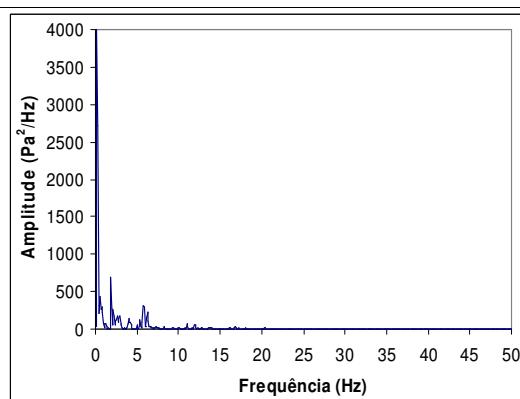
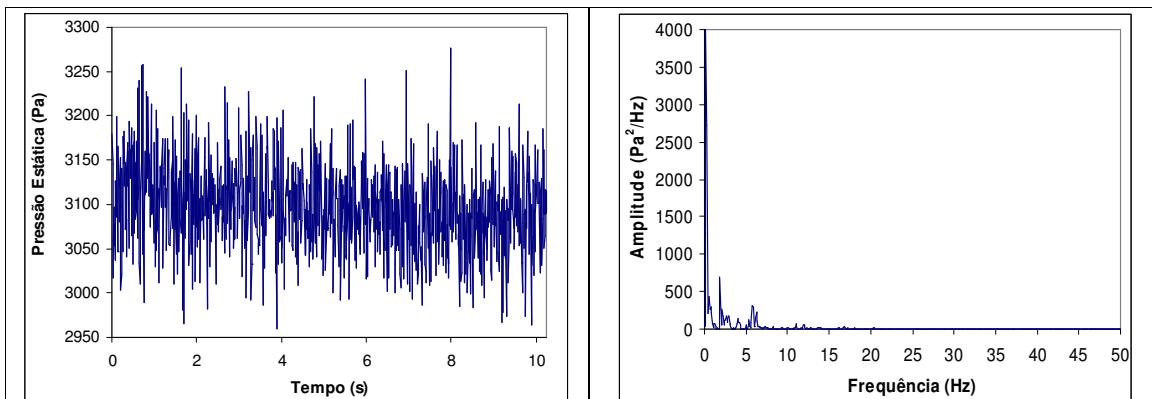
Altura de Leito Estático ($He = 16\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 5,5\text{cm}$):



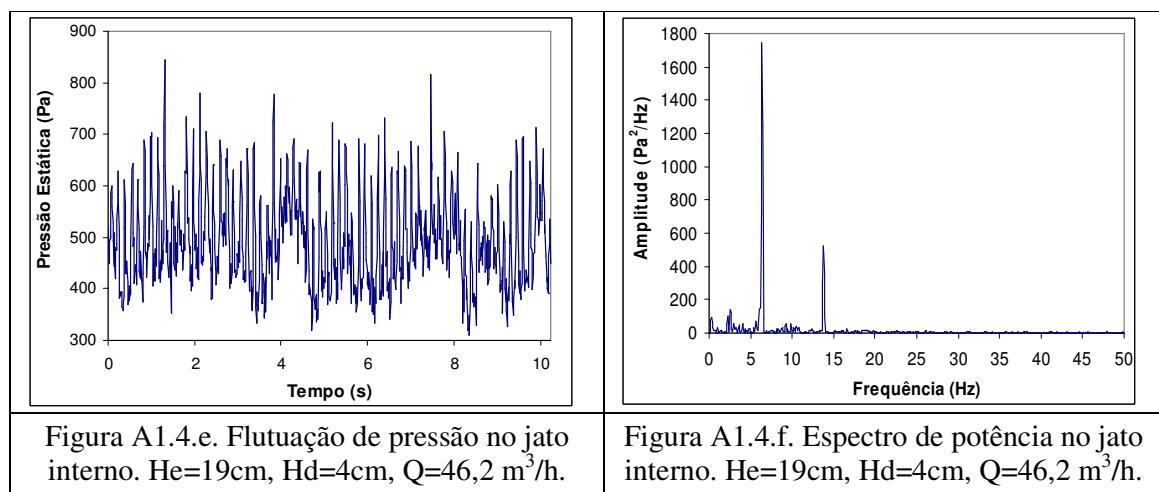
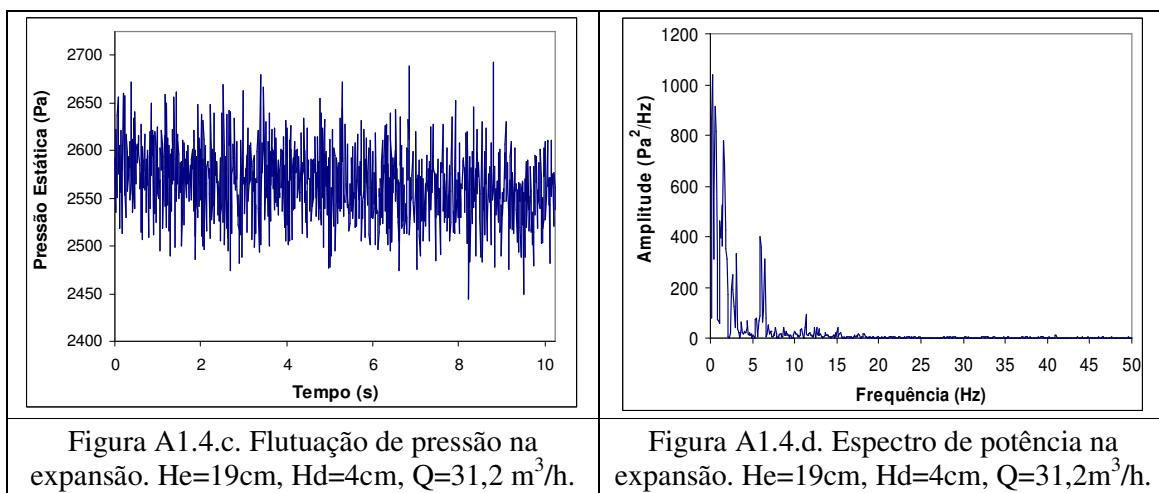
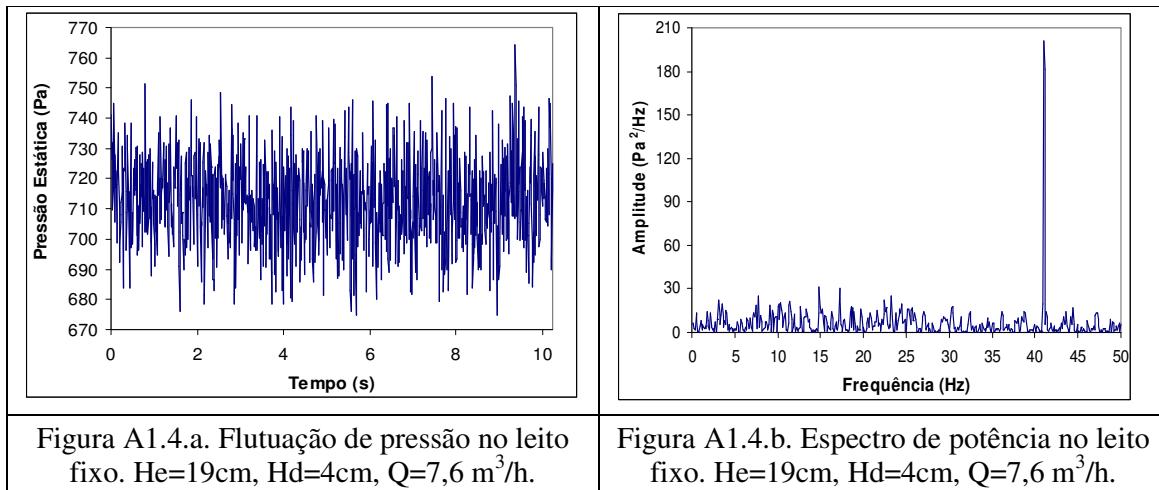


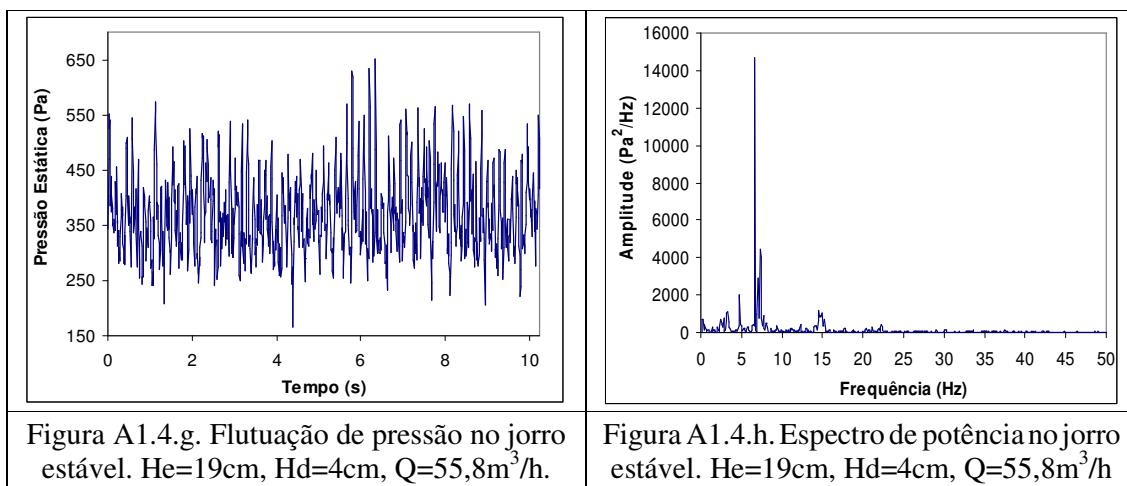
Altura de Leito Estático ($He = 16\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 7\text{cm}$):



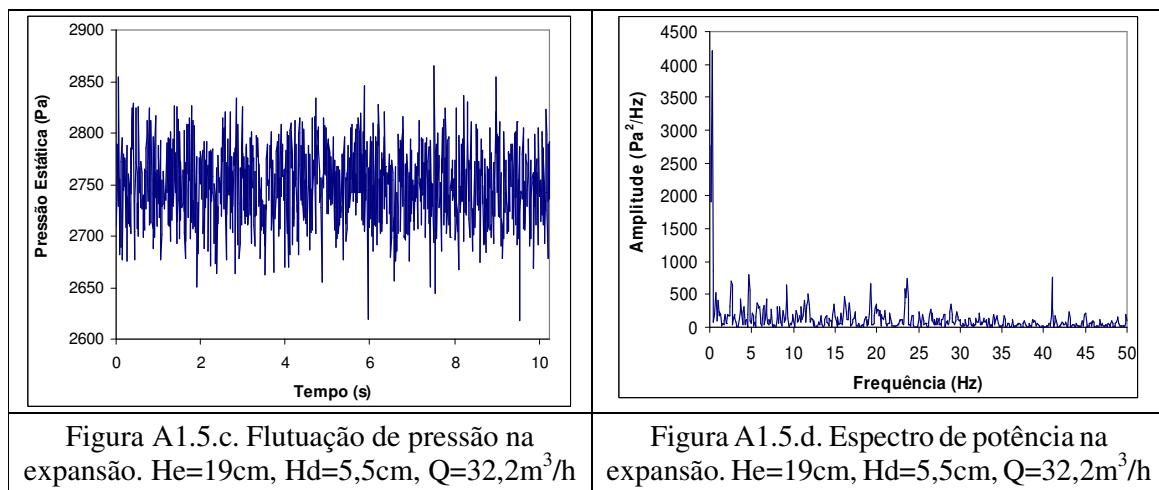
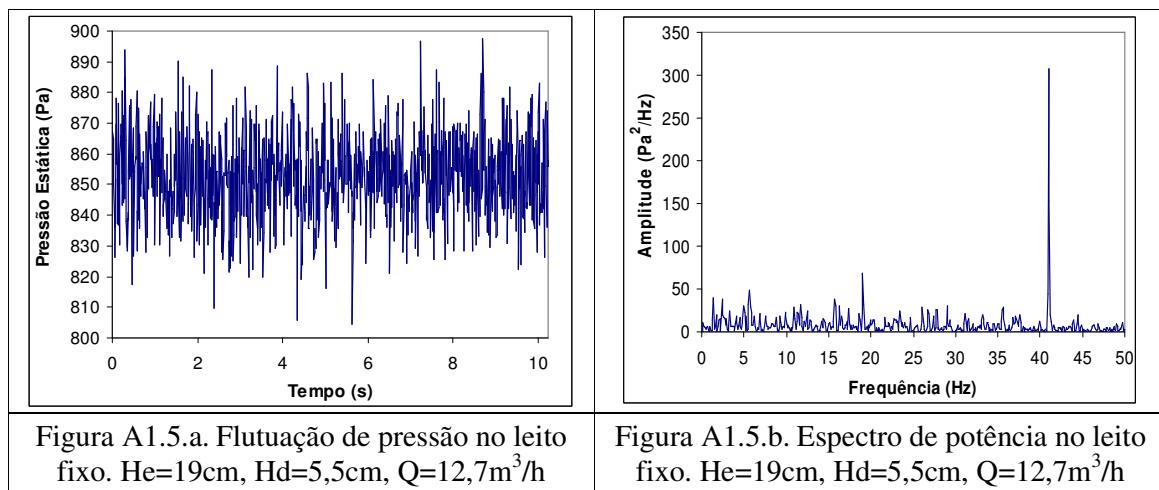


Altura de Leito Estático ($He = 19\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 4\text{cm}$):





Altura de Leito Estático ($He = 19\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 5,5\text{cm}$):



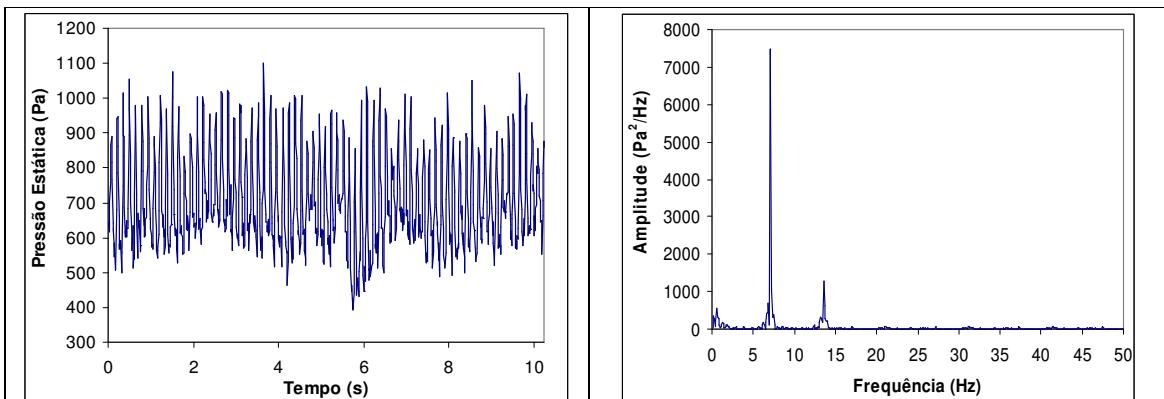


Figura A1.5.e. Flutuação de pressão no jato interno. $He=19\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$, $Q=53,3\text{m}^3/\text{h}$

Figura A1.5.f. Espectro de potência no jato interno. $He=19\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$, $Q=53,3\text{m}^3/\text{h}$

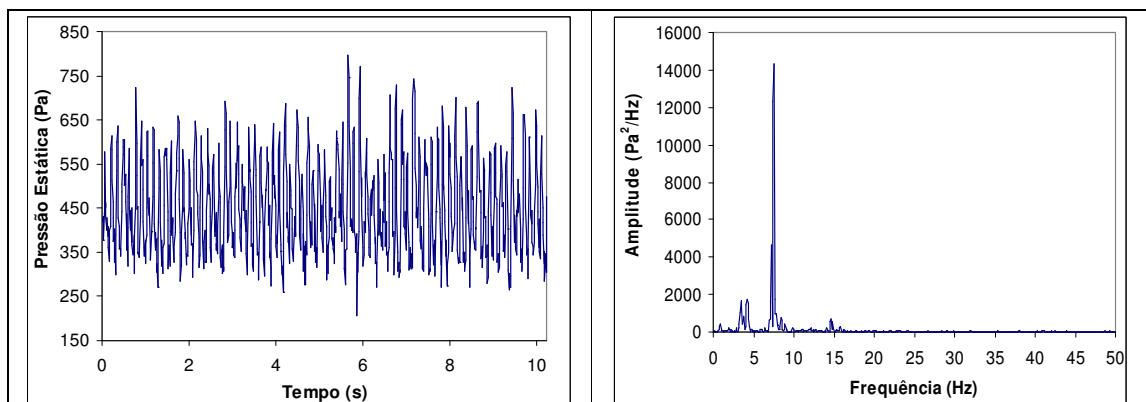
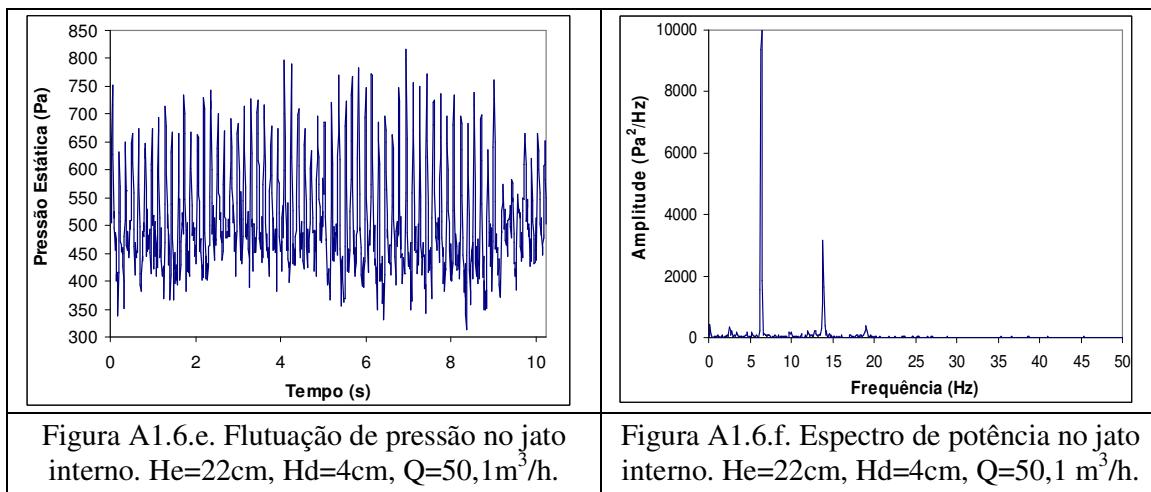
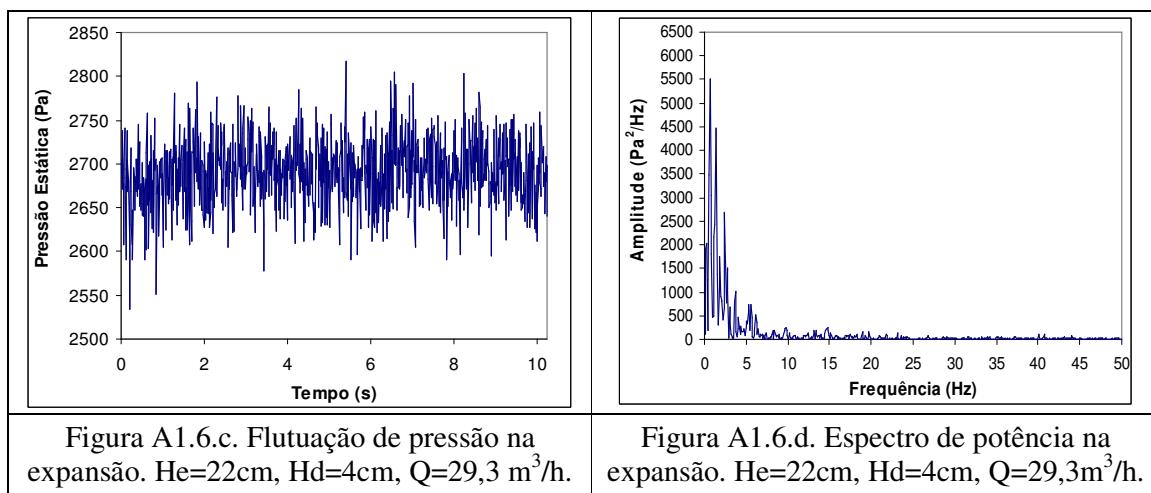
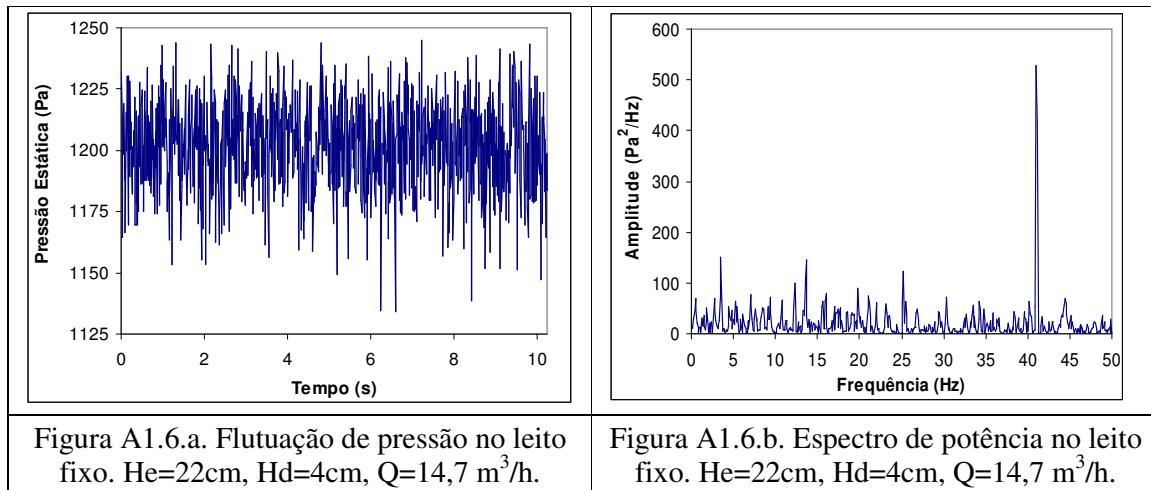
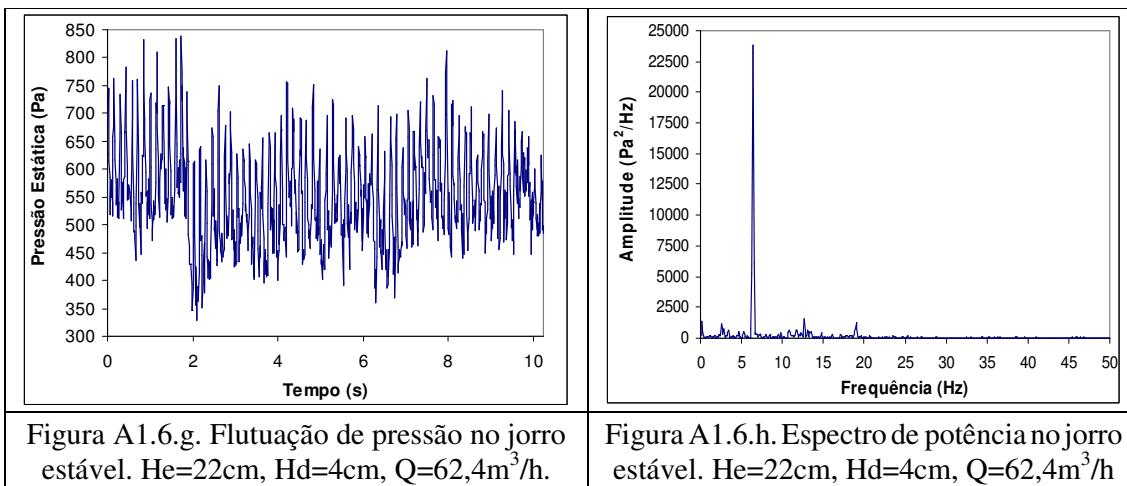


Figura A1.5.g. Flutuação de pressão no jorro estável. $He=19\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$, $Q=63,9\text{m}^3/\text{h}$

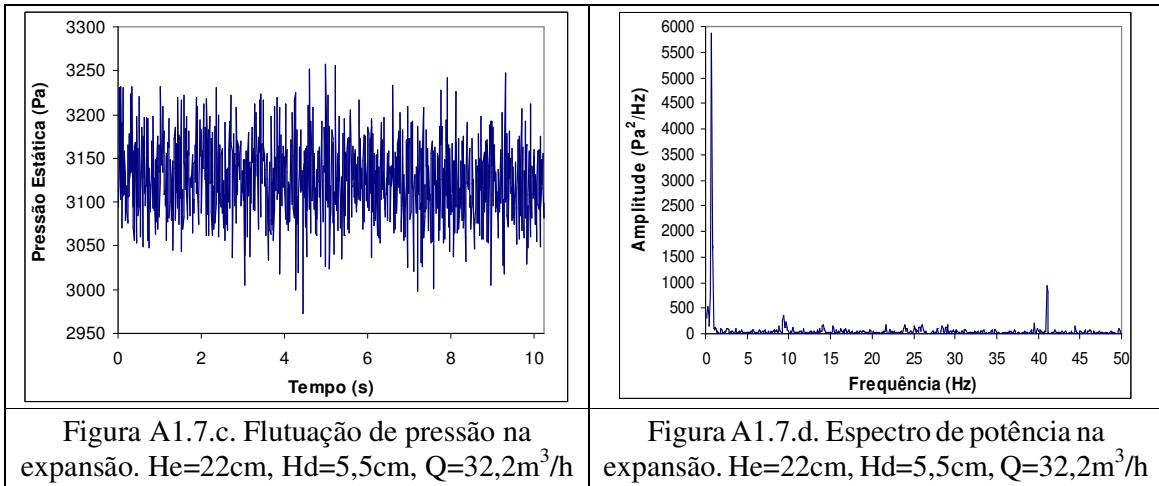
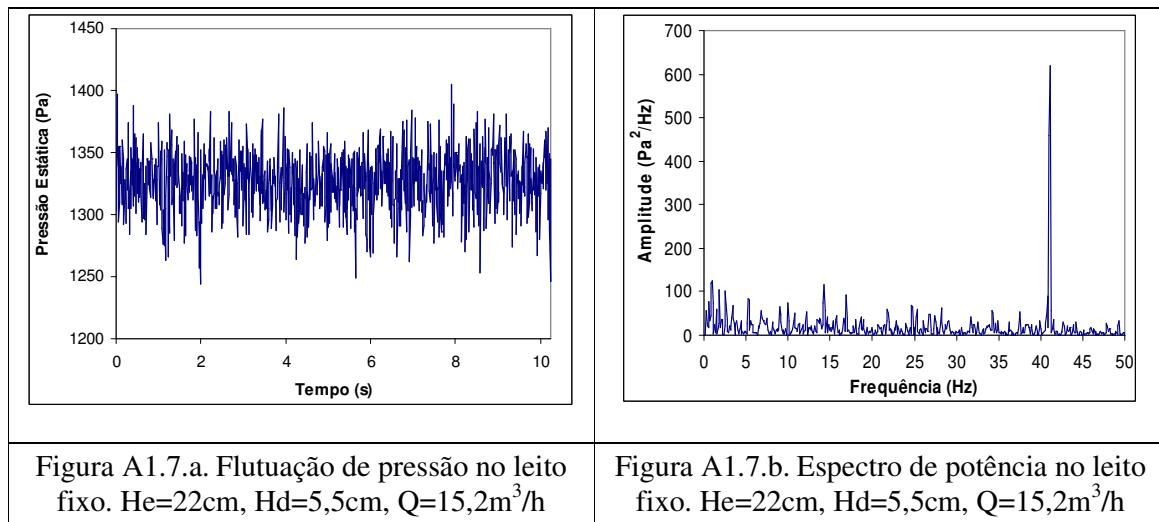
Figura A1.5.h. Espectro de potência no jato interno. $He=19\text{cm}$, $Hd=5,5\text{cm}$, $Q=63,9\text{m}^3/\text{h}$

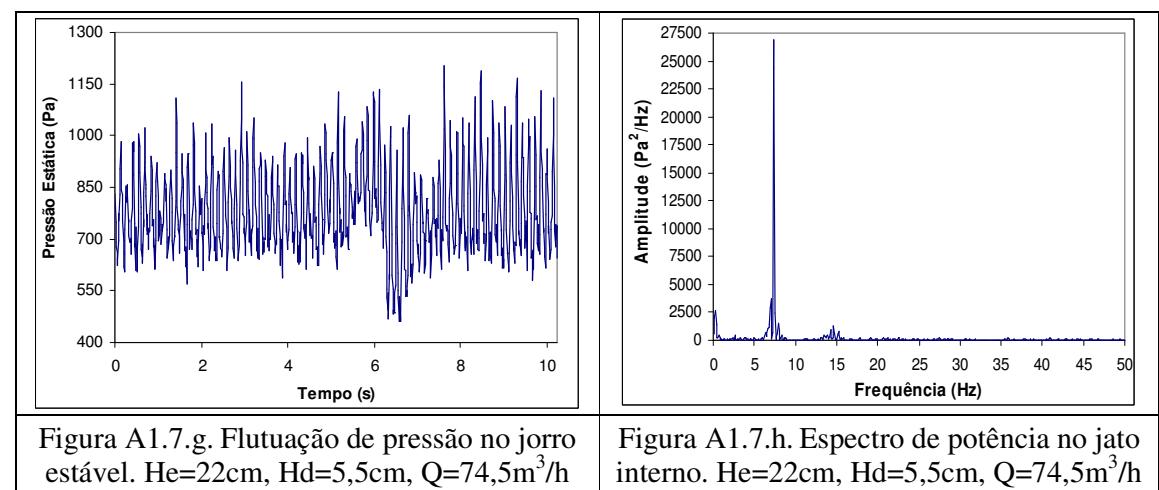
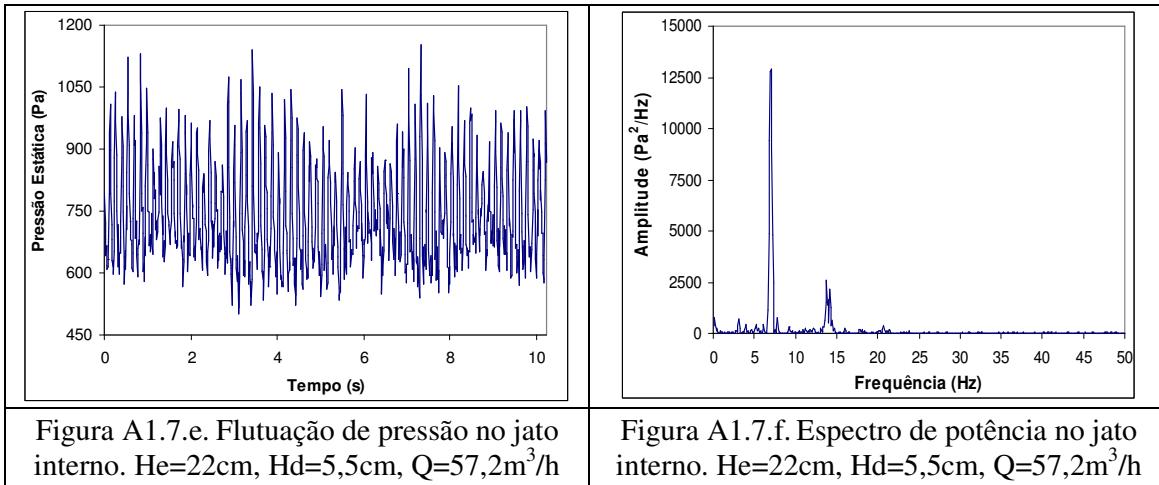
Altura de Leito Estático ($He = 22\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 4\text{cm}$):



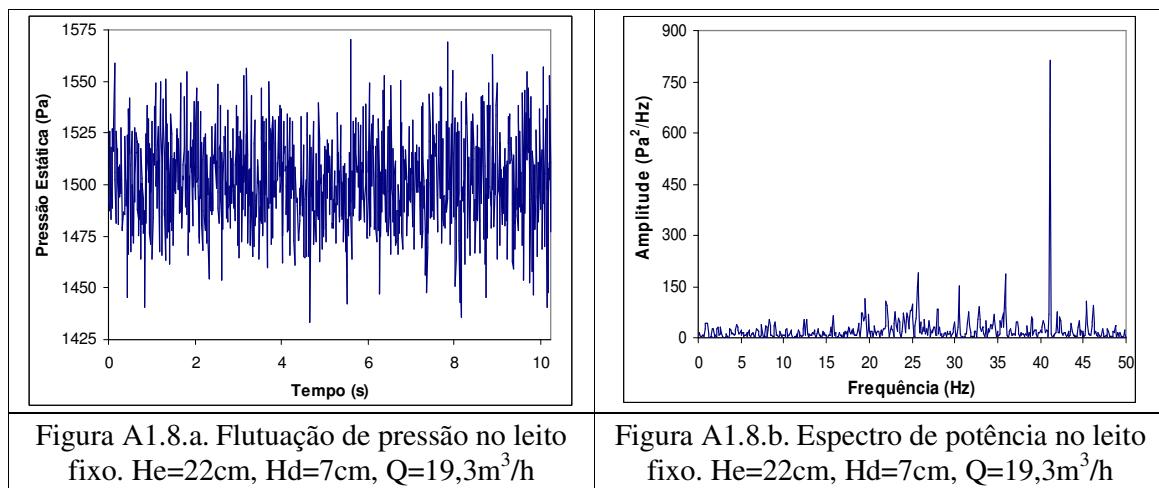


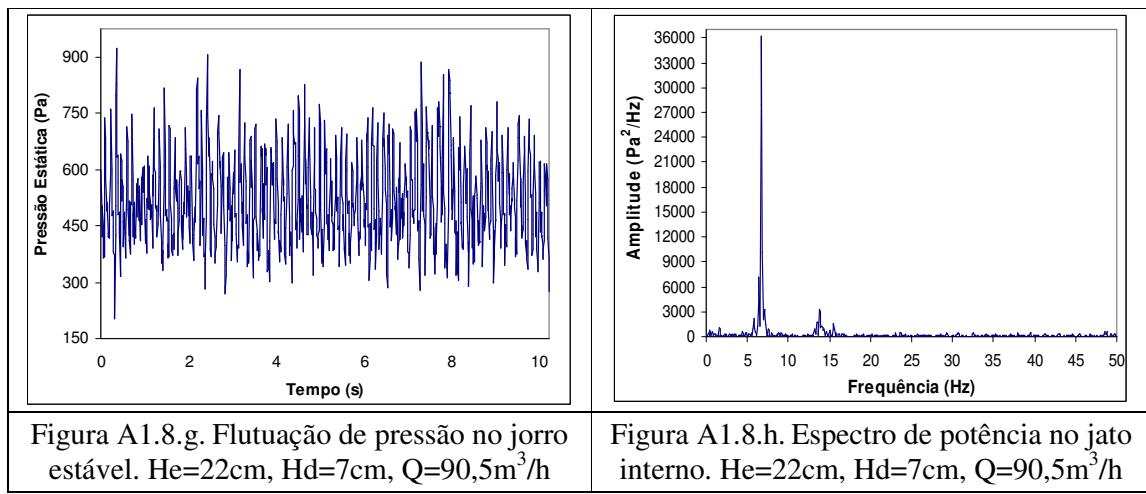
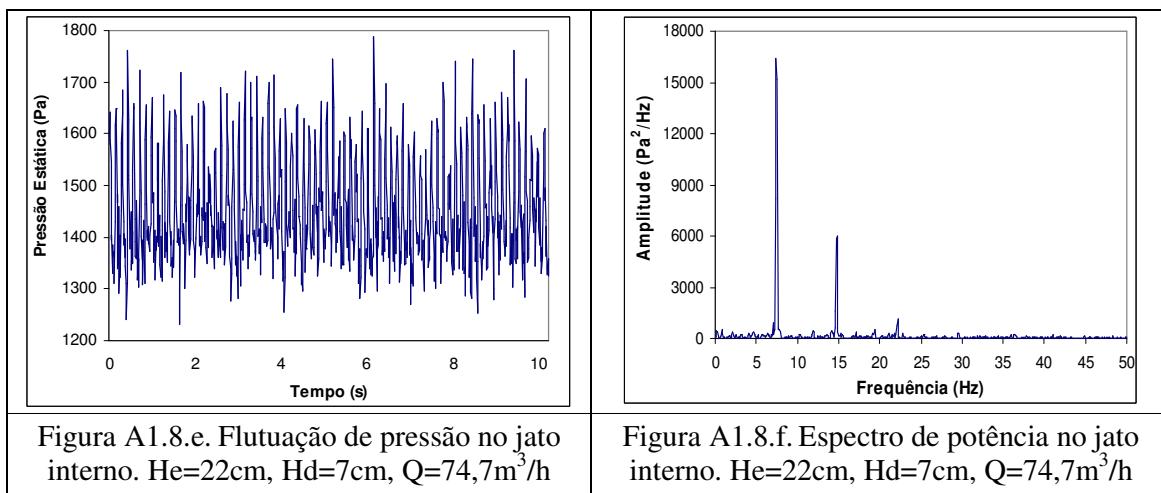
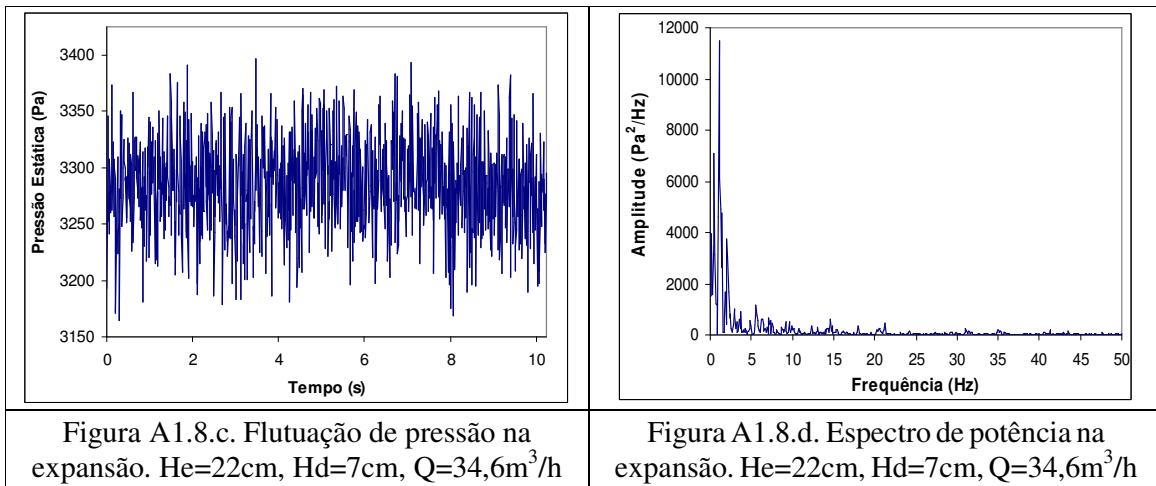
Altura de Leito Estático ($He = 22\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 5,5\text{cm}$):





Altura de Leito Estático ($He = 22\text{cm}$) e Distância do *Draft* à Base ($Hd = 7\text{cm}$):





ANEXO 2

Resultados de Jorro Mínimo e Curvas Características Experimental e Simuladas
Para as Demais Alturas de Leito Estático

Tabela A2.1 - Valores de Vazão de Jorro Mínimo Experimental e Simulada ($He = 16\text{cm}$).

	Vazão Exp. (m^3/h)	Vazão Sim. (m^3/h)	Erro Relativo (%)
Hd = 4cm	36,23	36,92	1,9
Hd = 5,5cm	46,87	46,27	1,3
Hd = 7cm	58,60	58,12	0,8

Tabela A2.2 - Queda de Pressão Experimental e Simulada no Jorro Mínimo ($He = 16\text{cm}$).

	ΔP Exp. (Pa)	ΔP Sim. (Pa)	Erro Relativo (%)
Hd = 4cm	545,03	707,21	29,76
Hd = 5,5cm	669,38	803,04	19,97
Hd = 7cm	772,76	808,23	4,59

Tabela A2.3 - Valores de Vazão de Jorro Mínimo Experimental e Simulada ($He = 22\text{cm}$).

	Vazão Exp. (m^3/h)	Vazão Sim. (m^3/h)	Erro Relativo (%)
Hd = 4cm	54,99	56,70	3,1
Hd = 5,5cm	67,75	69,17	2,1
Hd = 7cm	80,56	82,26	2,1

Tabela A2.4 - Queda de Pressão Experimental e Simulada no Jorro Mínimo ($He = 22\text{cm}$).

	ΔP Exp. (Pa)	ΔP Sim. (Pa)	Erro Relativo (%)
Hd = 4cm	641,2	829,4	29,4
Hd = 5,5cm	796,4	994,9	24,9
Hd = 7cm	1123,4	1236,7	10,1

Altura de Leito Estático ($He = 16\text{cm}$):

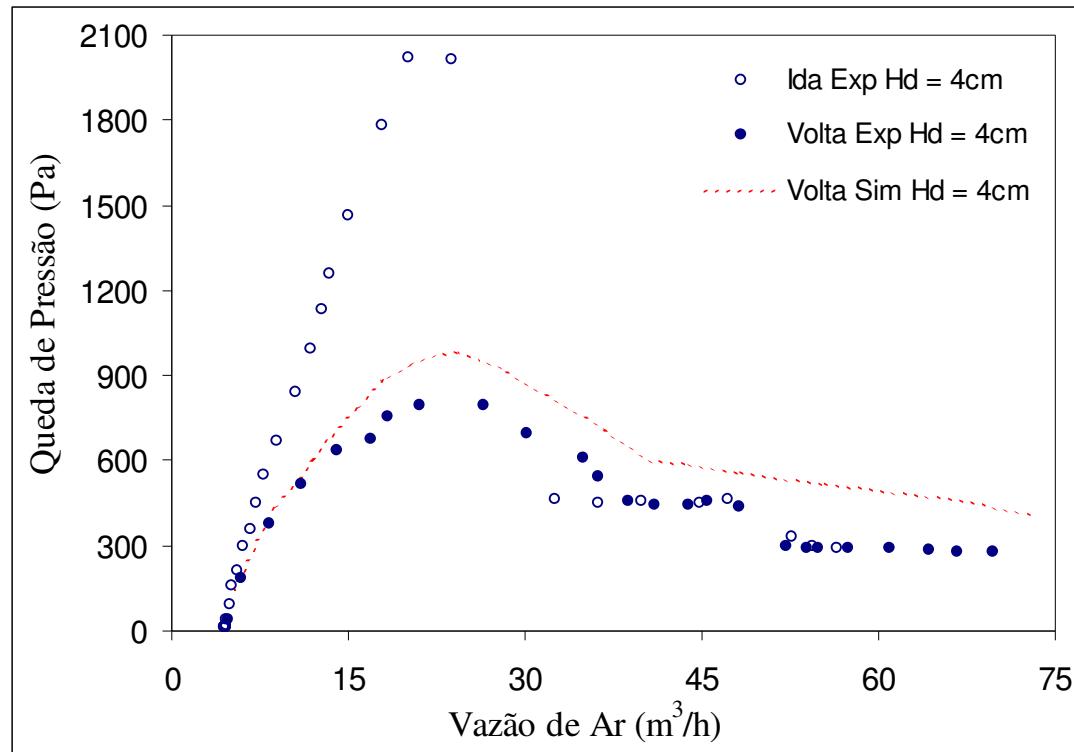


Figura A2.1 - Curvas características experimentais e simuladas ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).

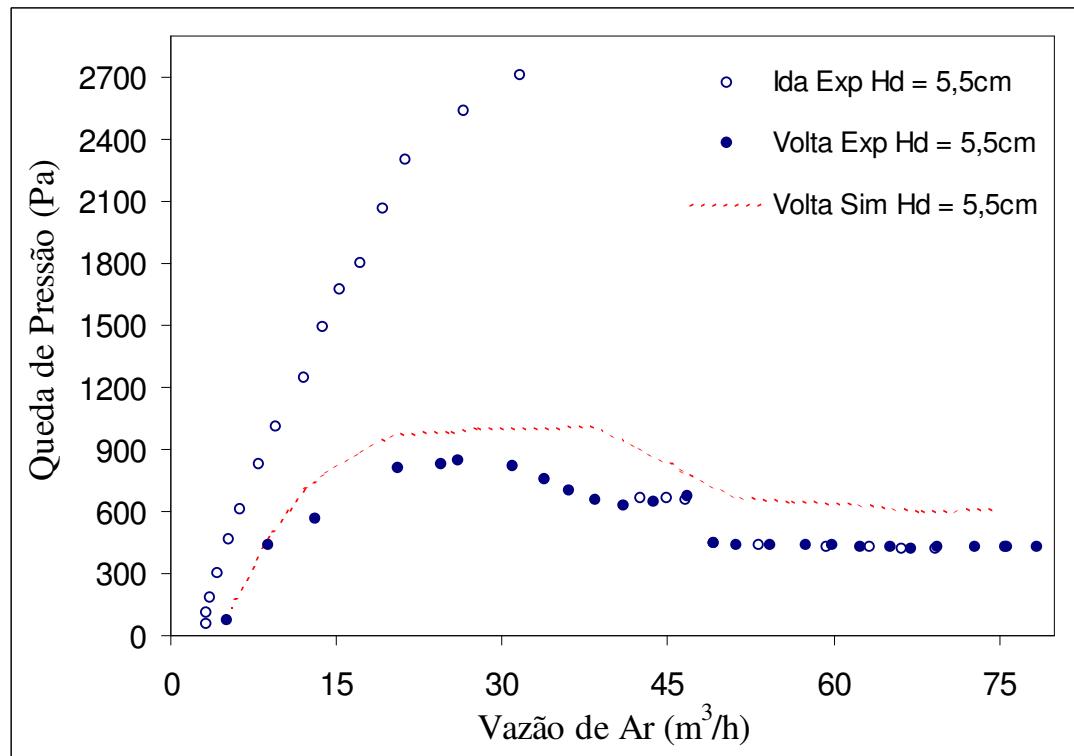


Figura A2.2 - Curvas características experimentais e simuladas ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).

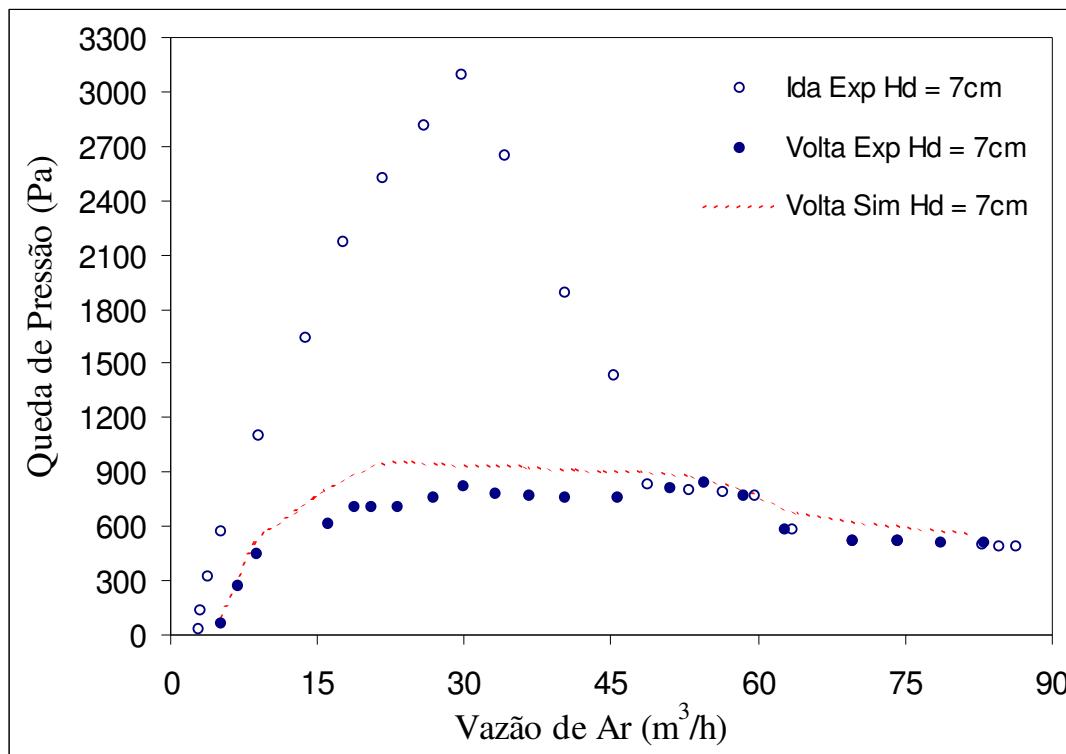


Figura A2.3 - Curvas características experimental e simulada (He = 16cm e Hd = 7cm).

Altura de Leito Estático (He = 22 cm):

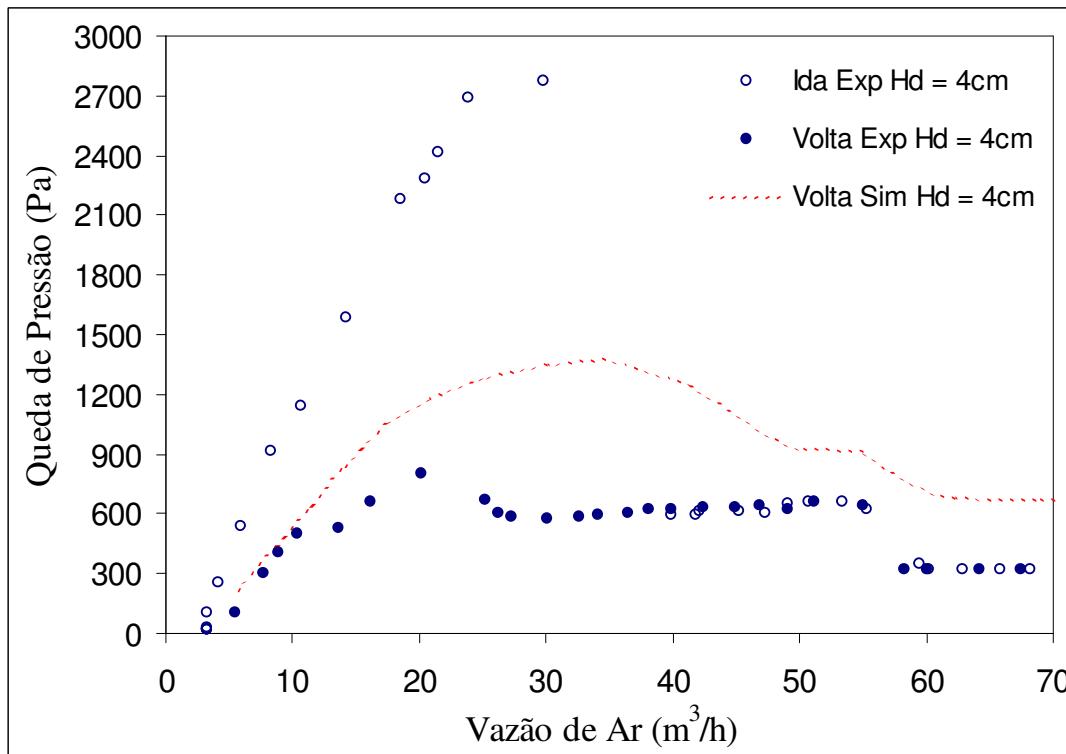


Figura A2.4 - Curvas características experimental e simulada (He = 22cm e Hd = 4cm).

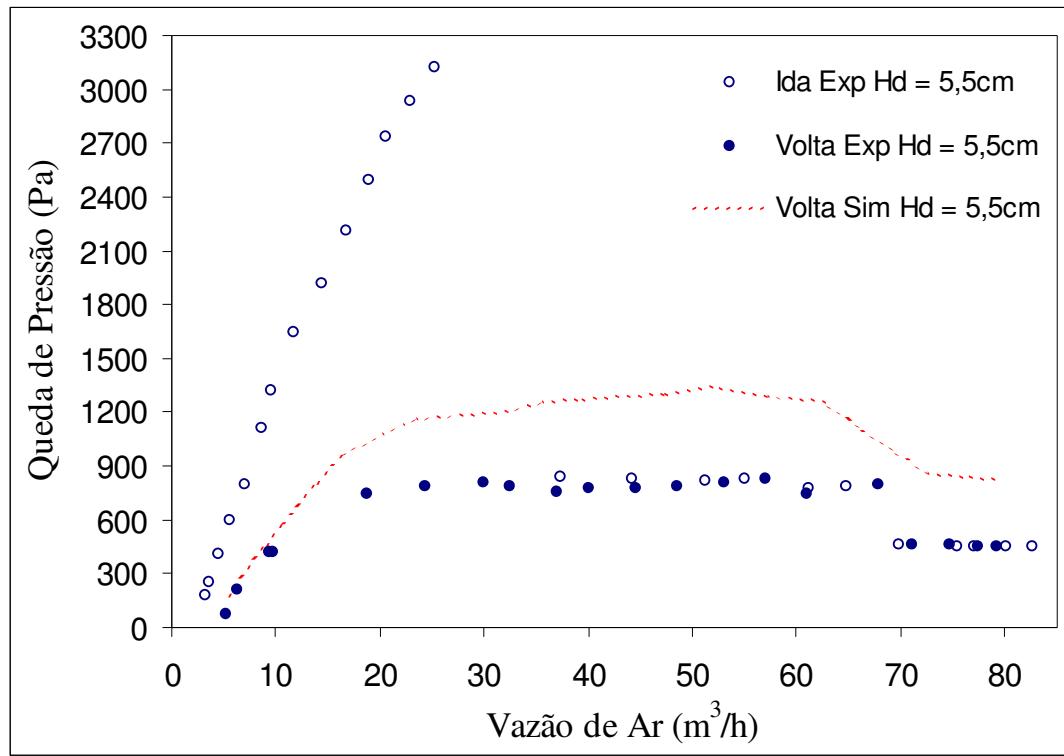


Figura A2.5 - Curvas características experimental e simulada ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 5,5\text{cm}$).

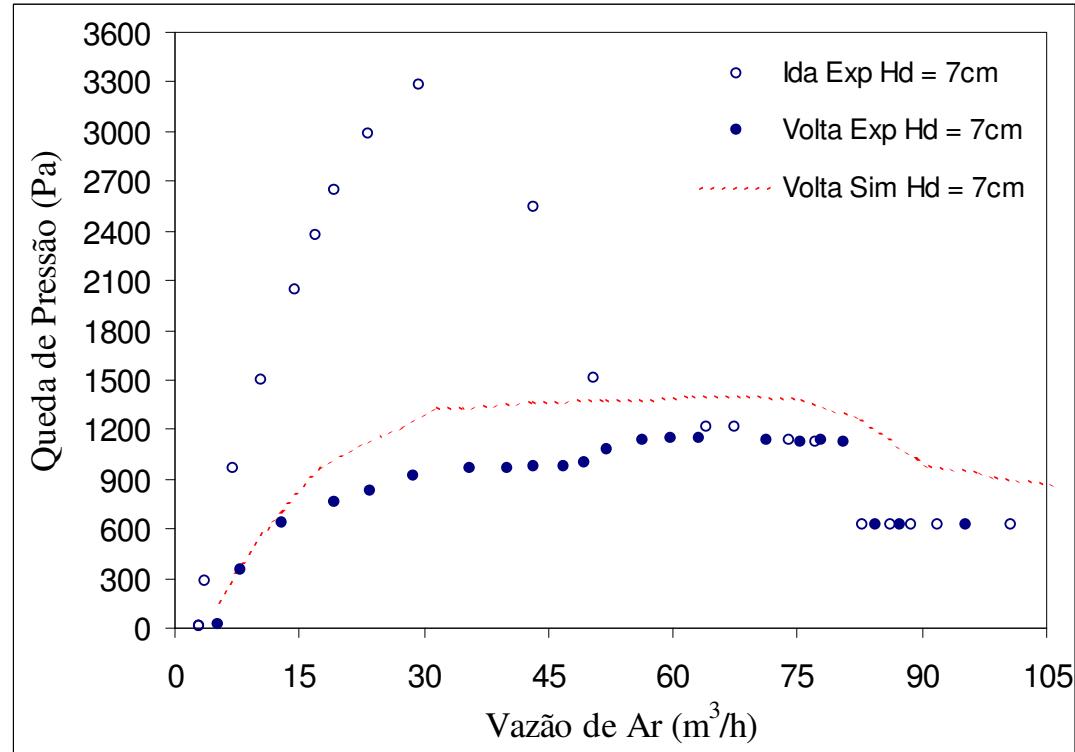


Figura A2.6 - Curvas características experimental e simulada ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).

ANEXO 3

Perfis Fração de Volume de Sólidos para as Demais Configurações Estudadas

Altura de Leito Estático ($He = 16\text{cm}$):

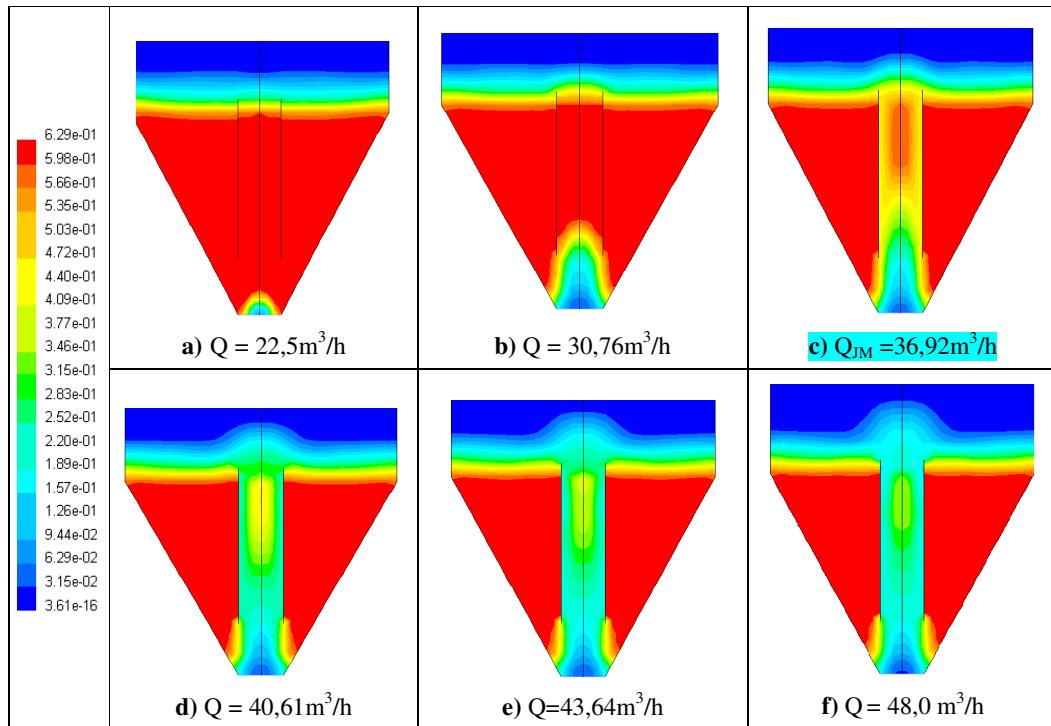


Figura A3.1 – Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).

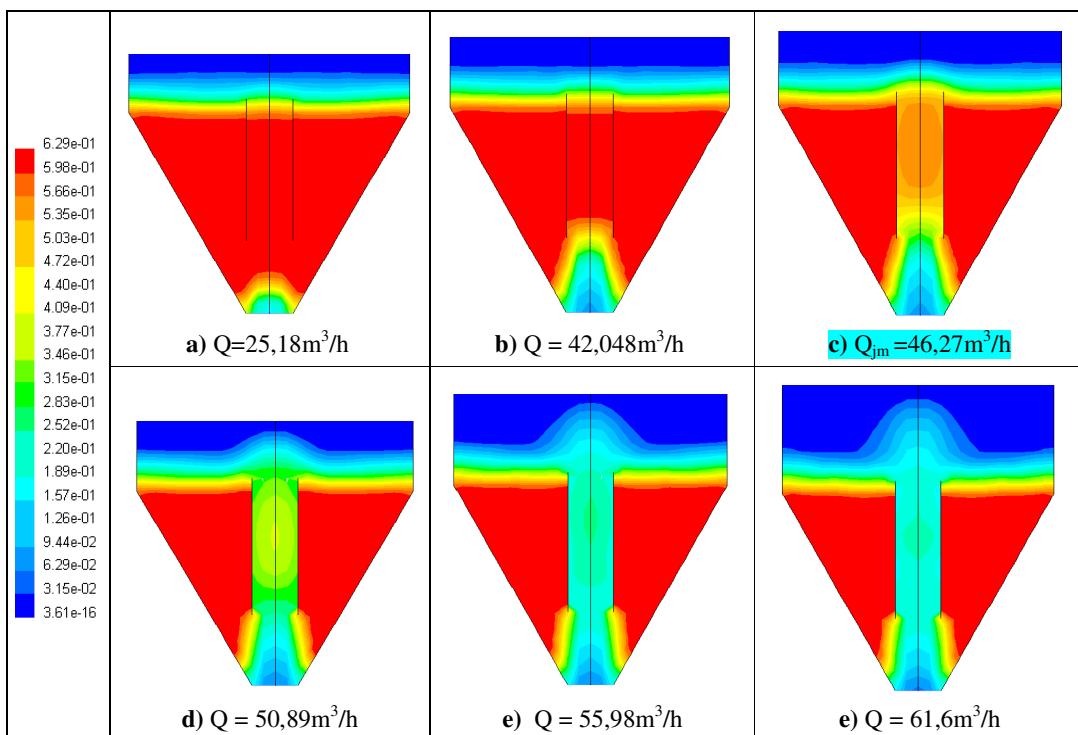


Figura A3.2 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He=16\text{cm}$ e $Hd=5,5\text{cm}$).

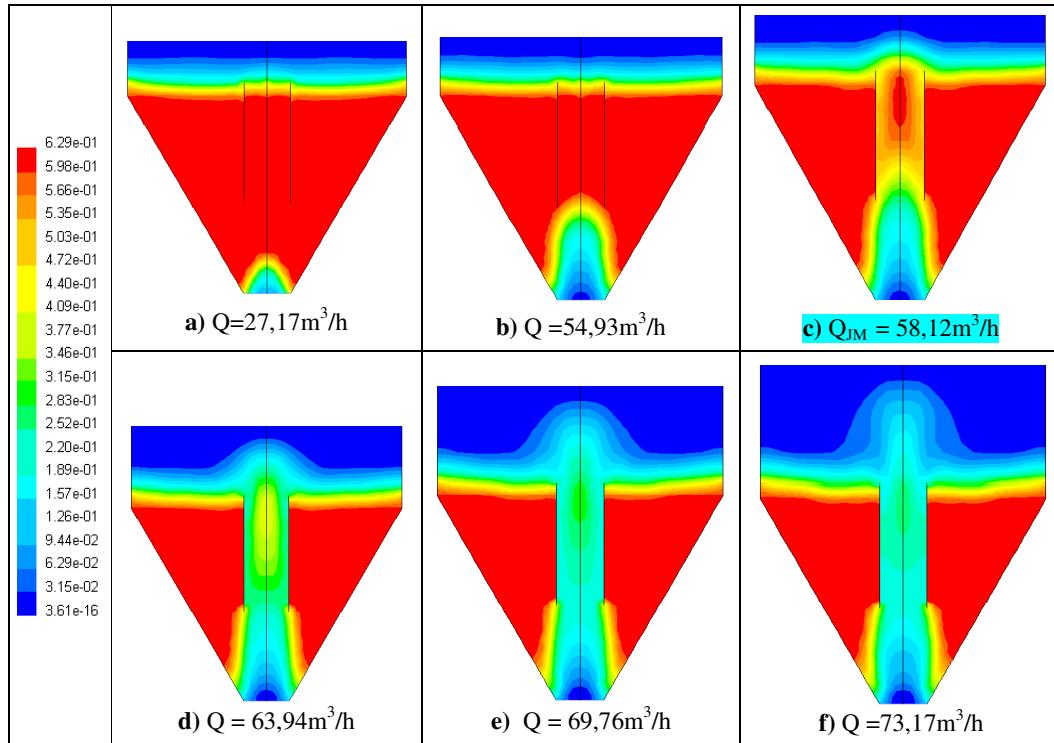


Figura A3.3 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 16\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).

Altura de Leito Estático ($He = 22\text{cm}$):

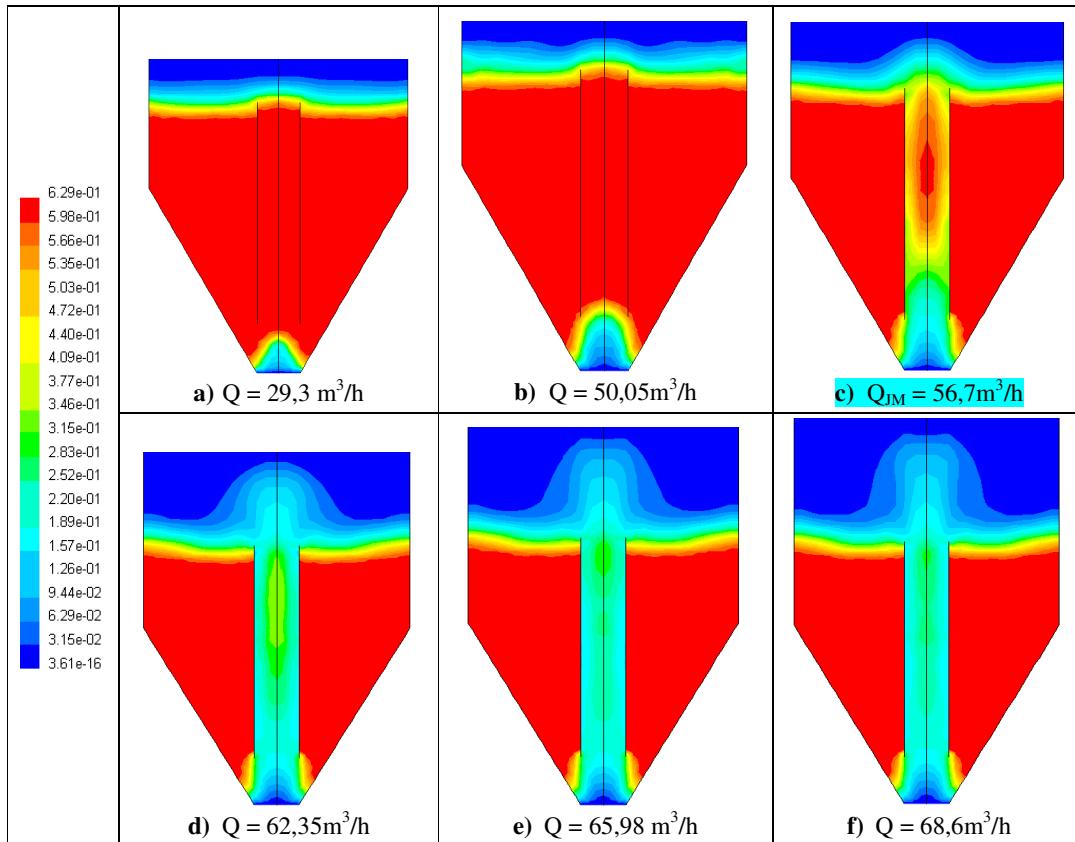


Figura A3.4 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 4\text{cm}$).

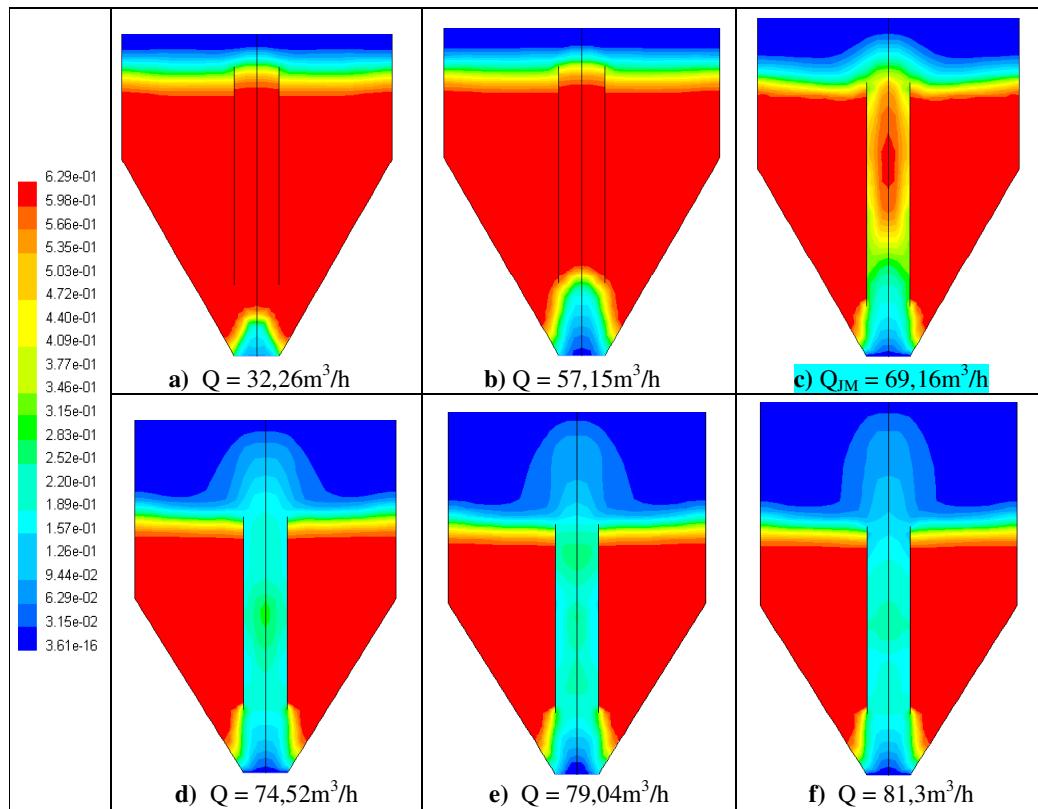


Figura A3.5 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He=22\text{cm}$ e $Hd=5,5\text{cm}$).

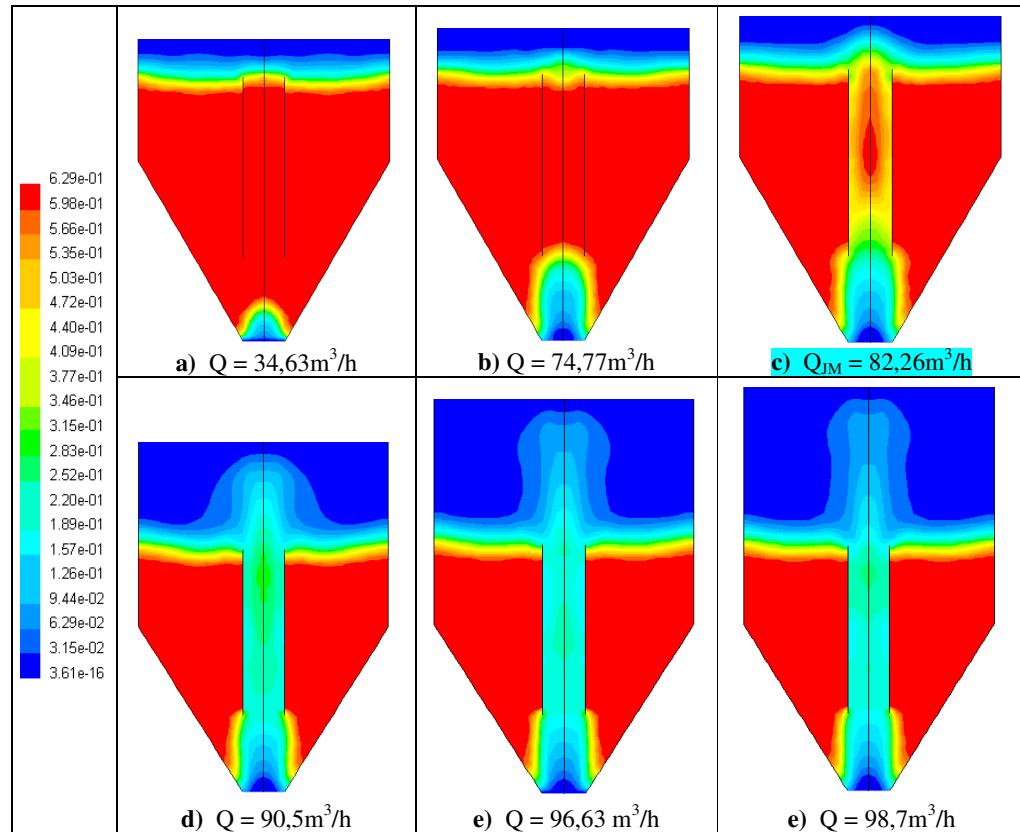


Figura A3.6 - Fração de volume de sólidos para o leito de jorro ($He = 22\text{cm}$ e $Hd = 7\text{cm}$).

ANEXO 4

Perfis Axiais de Porosidade e de Velocidade dos Sólidos
Para as Demais Configurações Estudadas

Altura de Leito Estático (He = 16 cm):

Perfis simulados a uma vazão 20% superior à de mínimo jorro experimental ($Q_{1,2M}^{\text{exp}}$).

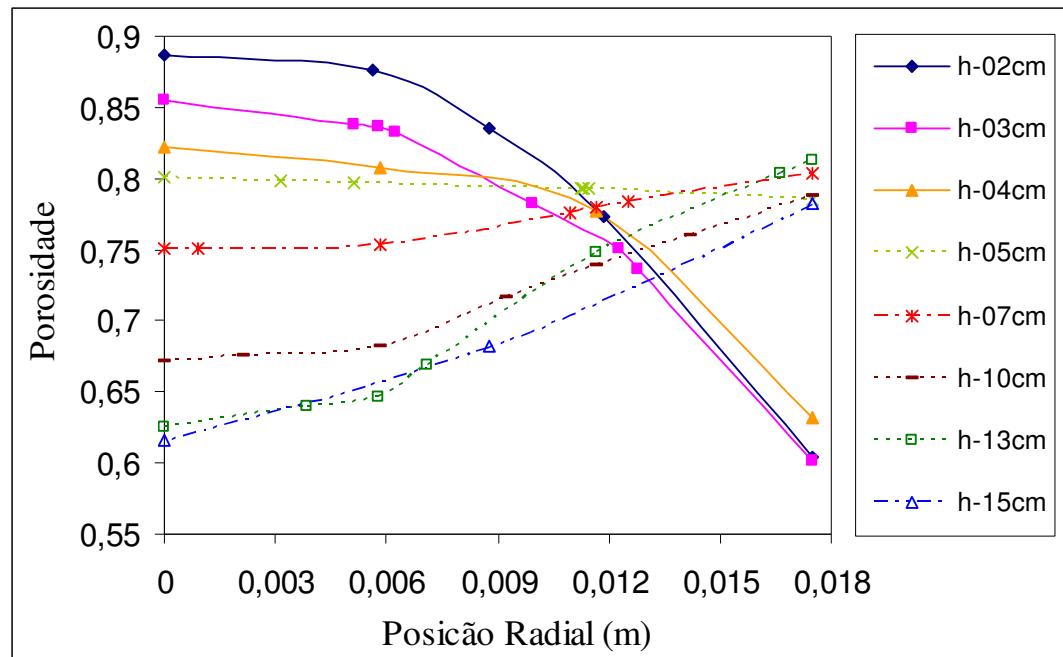


Figura A4.1 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
($Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 43,64 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16 \text{ cm}$ e $Hd = 4 \text{ cm}$).

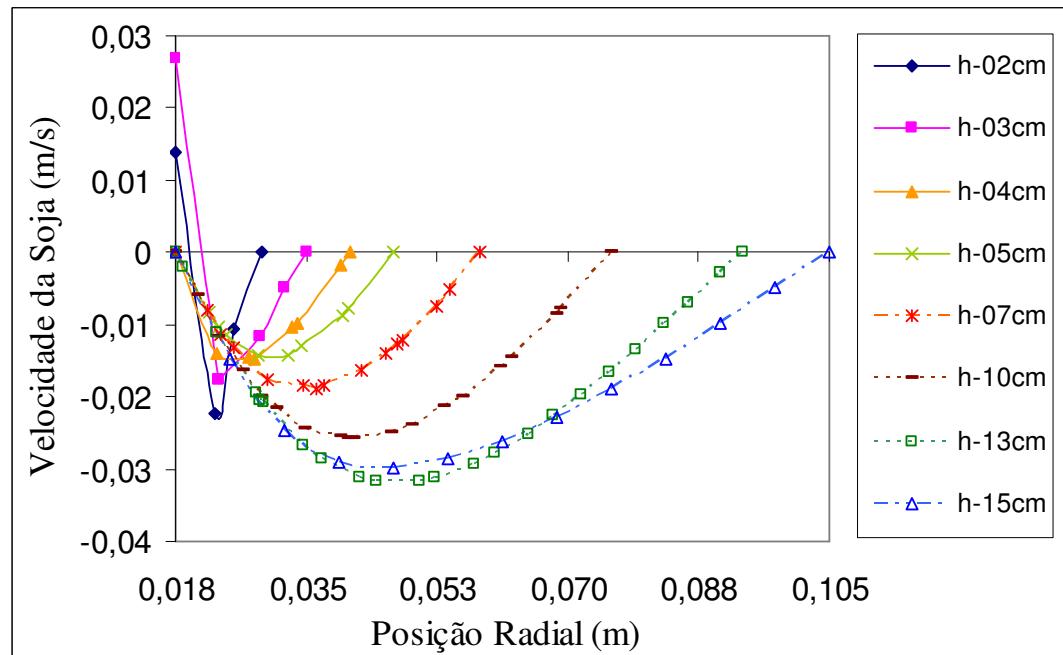


Figura A4.2 - Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais.
($Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 43,64 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 16 \text{ cm}$ e $Hd = 4 \text{ cm}$).

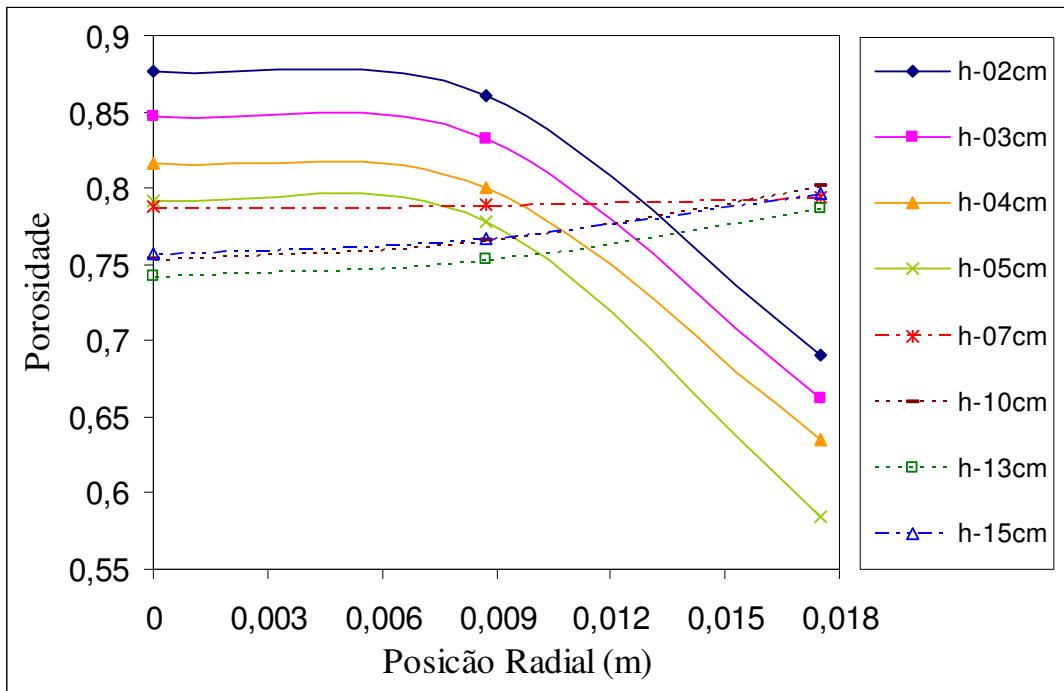


Figura A4.3 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 55,98 \text{ m}^3/\text{h}, He = 16 \text{ cm e } Hd = 5,5 \text{ cm})$.

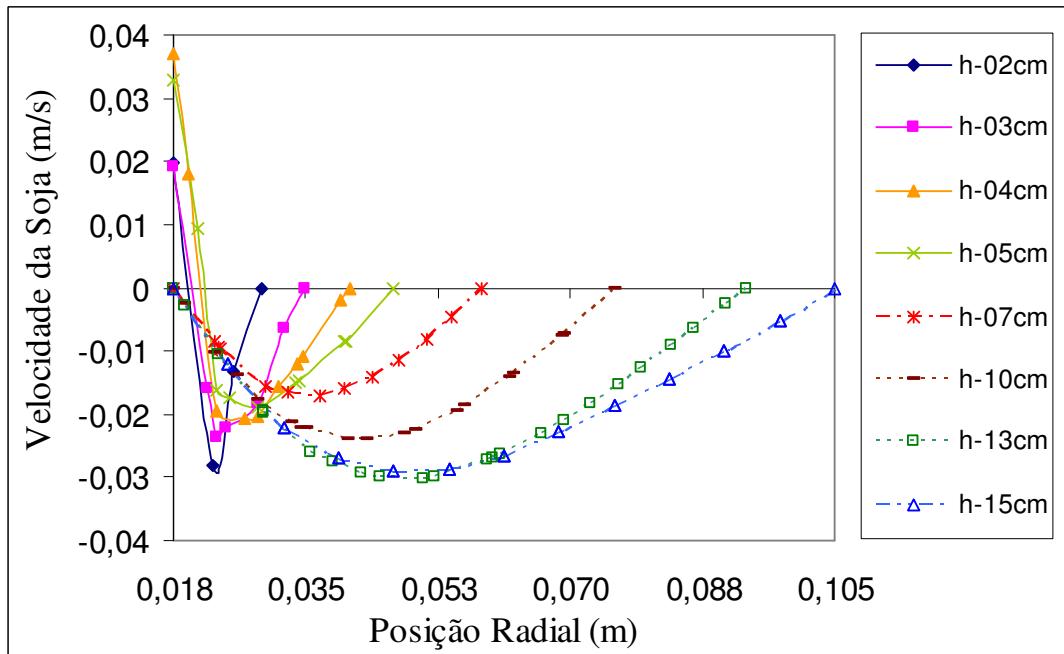


Figura A4.4 - Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 55,98 \text{ m}^3/\text{h}, He = 16 \text{ cm e } Hd = 5,5 \text{ cm})$.

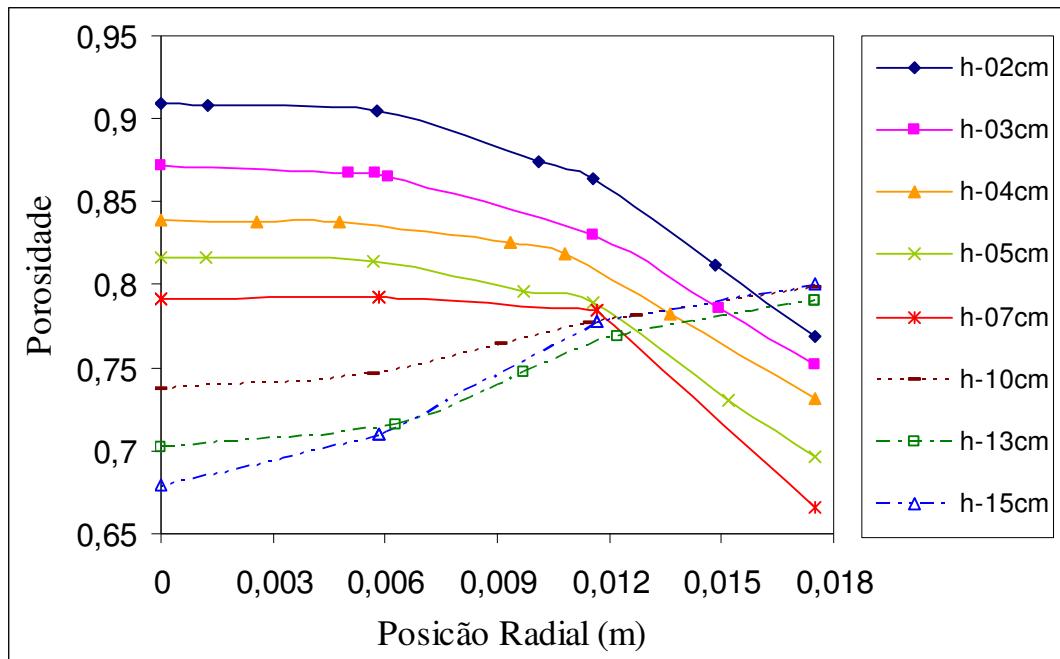


Figura A4.5 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{exp} = 69,75 \text{ m}^3/\text{h}, He = 16 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.

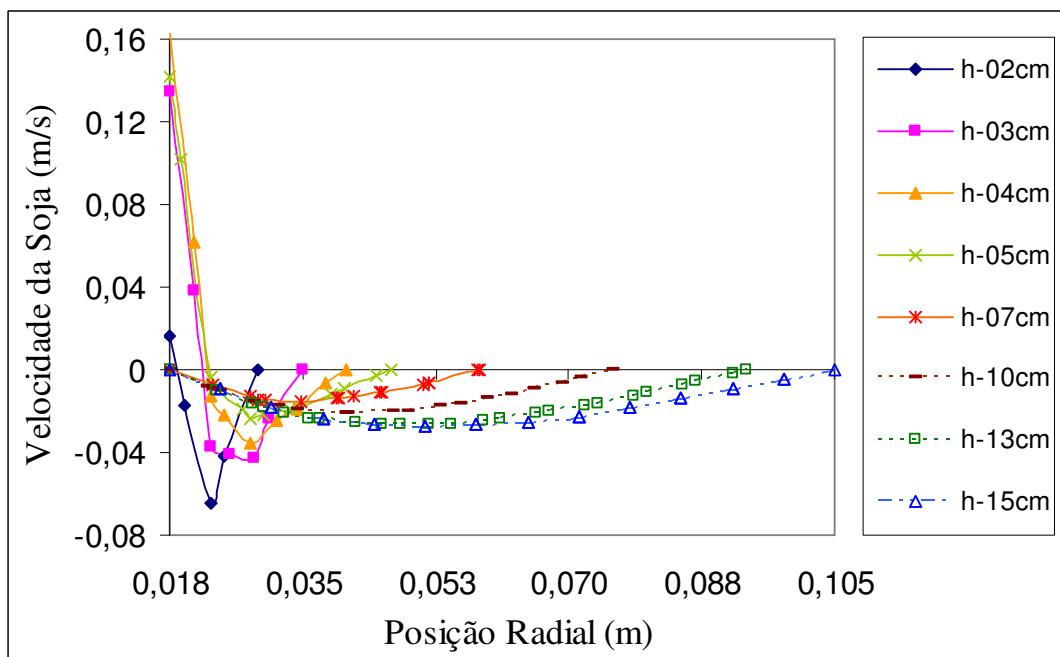


Figura A4.6 - Distribuição radial simulada de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{exp} = 69,75 \text{ m}^3/\text{h}, He = 16 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.

Altura de Leito Estático (He = 22 cm):

Perfis simulados a uma vazão 20% superior à de mínimo jorro experimental ($Q_{1,2M}^{\text{exp}}$).

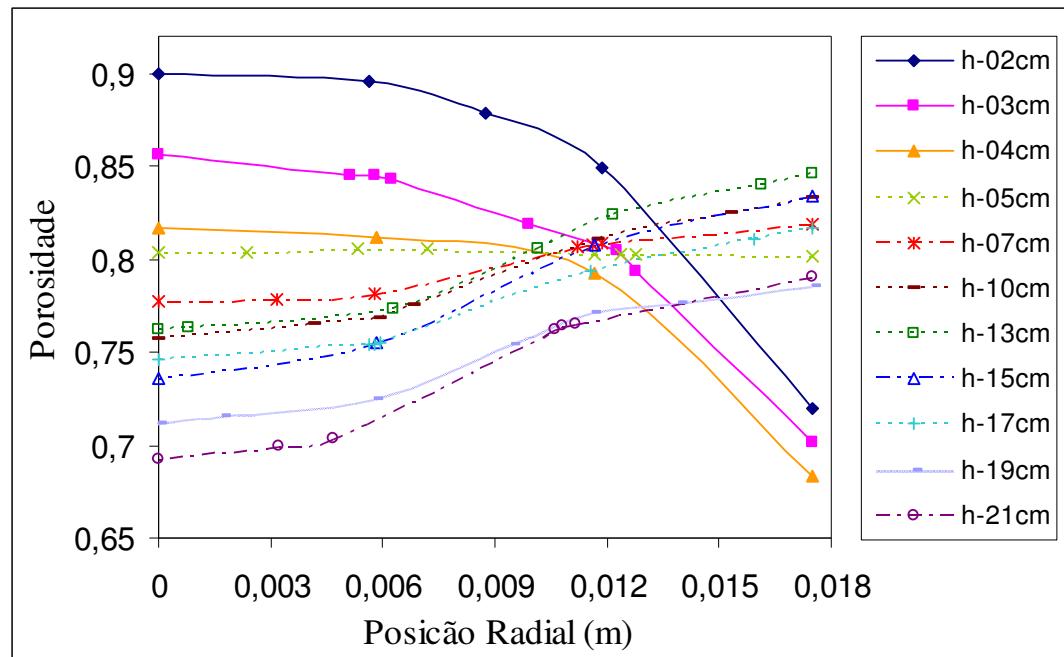


Figura A4.7 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
($Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 65,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22 \text{ cm}$ e $Hd = 4 \text{ cm}$).

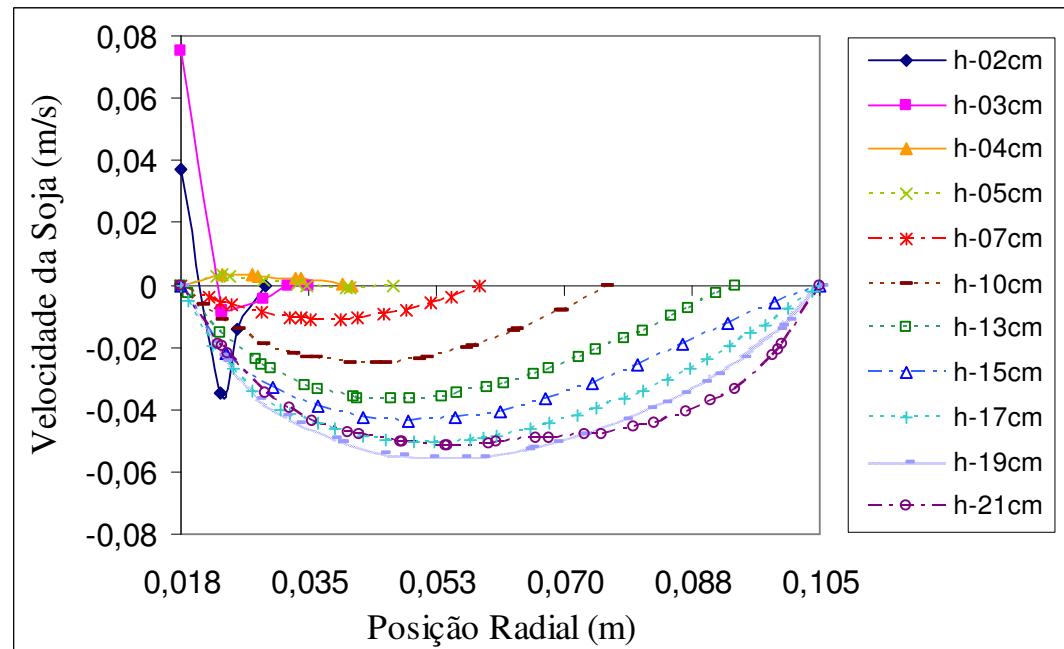


Figura A4.8 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
($Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 65,98 \text{ m}^3/\text{h}$, $He = 22 \text{ cm}$ e $Hd = 4 \text{ cm}$).

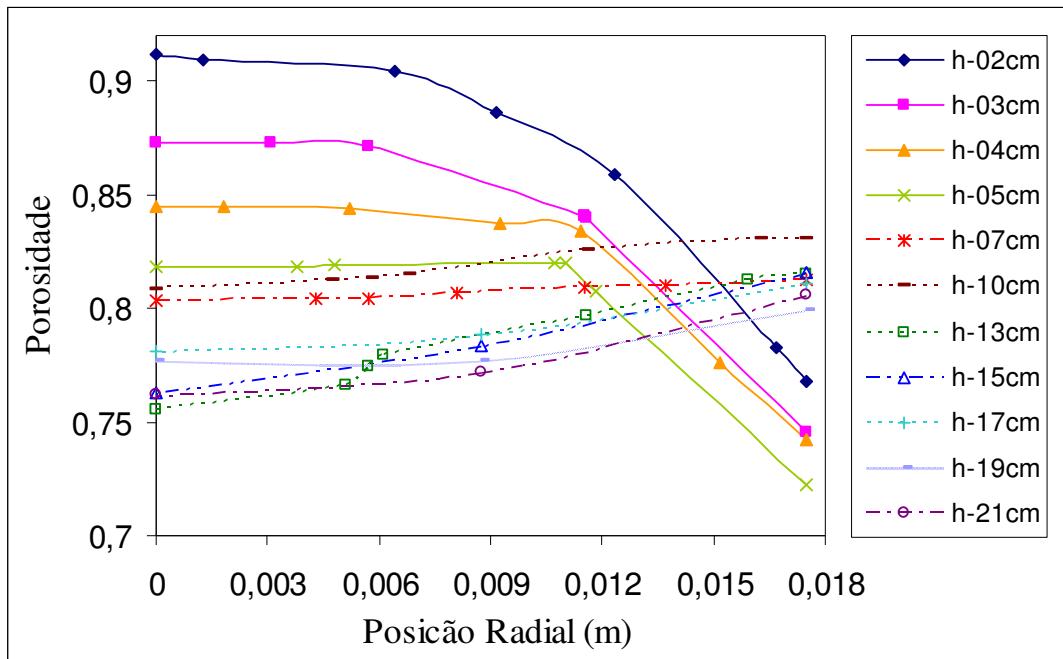


Figura A4.9 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 81,3 \text{ m}^3/\text{h}, He = 22 \text{ cm e Hd} = 5,5 \text{ cm})$.

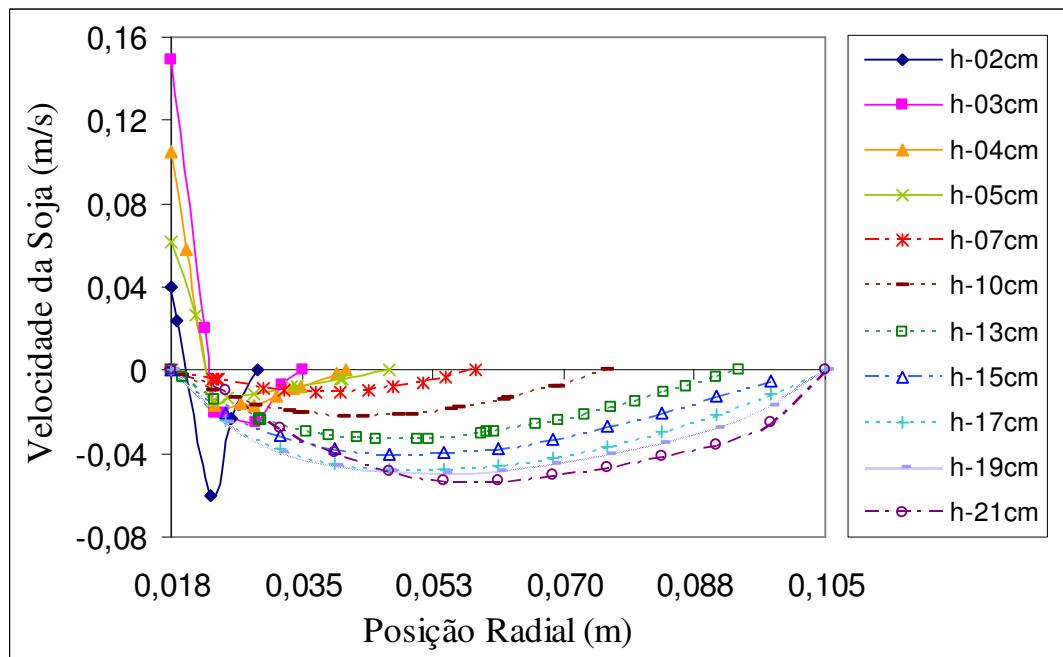


Figura A4.10 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{\text{exp}} = 81,3 \text{ m}^3/\text{h}, He = 22 \text{ cm e Hd} = 5,5 \text{ cm})$.

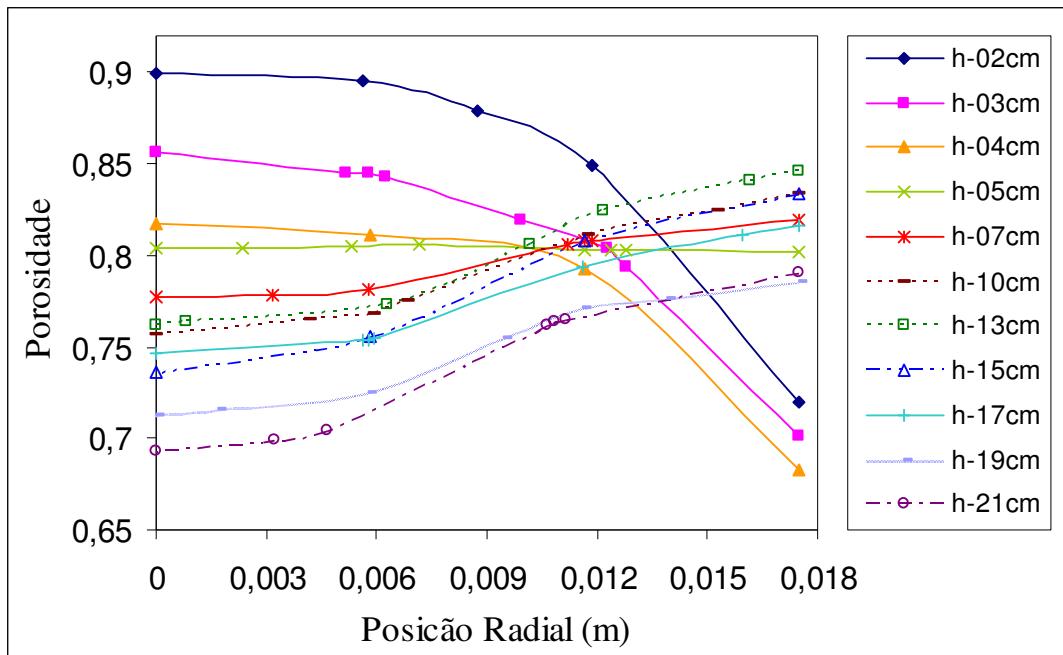


Figura A4.11 - Distribuição radial de porosidade simulada para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{exp} = 96,63 \text{ m}^3/\text{h}, He = 22 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.

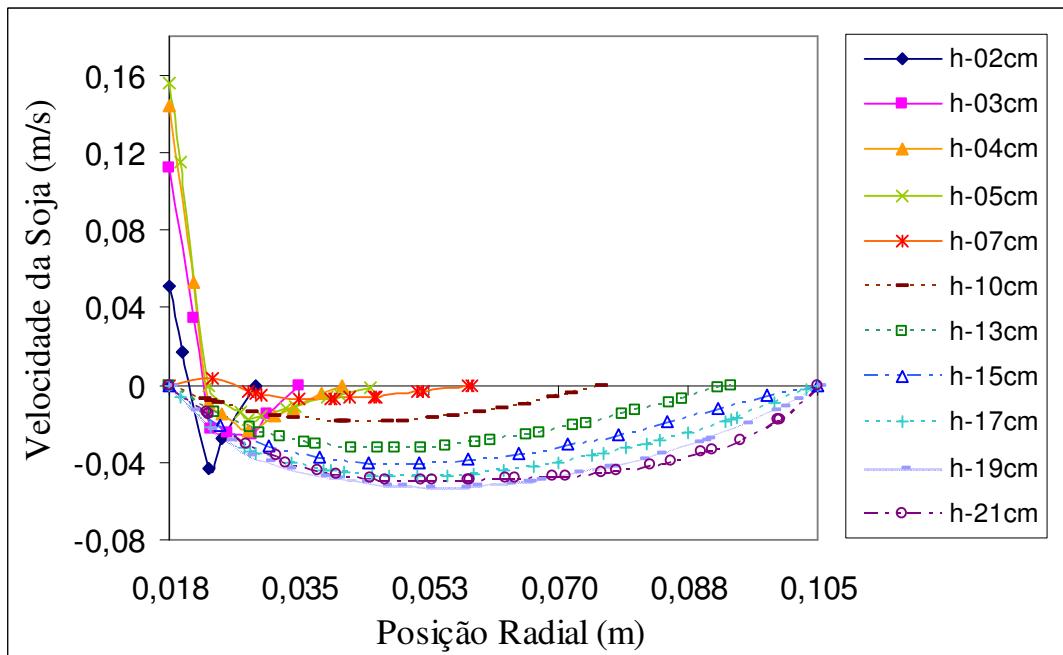


Figura A4.12 - Distribuição radial simulado de velocidade da soja para várias alturas axiais.
 $(Q_{1,2M}^{exp} = 96,63 \text{ m}^3/\text{h}, He = 22 \text{ cm e } Hd = 7 \text{ cm})$.