

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Simulação de um alimentador Venturi em trecho
ascendente no transporte pneumático de sólidos.**

Thiago Faggion de Pádua

São Carlos – SP

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Simulação de um alimentador Venturi em trecho
ascendente no transporte pneumático de sólidos.**

Thiago Faggion de Pádua

Tese apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutor em Engenharia Química, área de concentração de pesquisa e desenvolvimento de processos químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

São Carlos – SP

2012

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P125sa

Pádua, Thiago Faggion de.

Simulação de um alimentador Venturi em trecho ascendente no transporte pneumático de sólidos / Thiago Faggion de Pádua. -- São Carlos : UFSCar, 2012. 143 f.

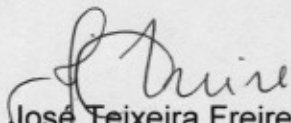
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

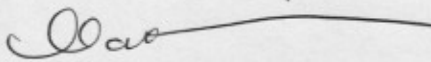
1. Fluidização. 2. Transporte por tubo pneumático. 3. Alimentador de sólidos. 4. Sistemas particulados. 5. Fluidodinâmica. 6. CFD. I. Título.

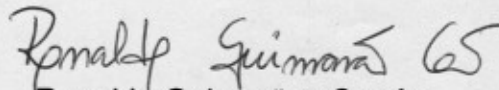
CDD: 660.284292 (20^a)

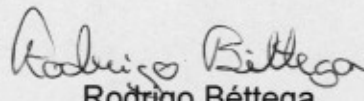
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **THIAGO FAGGION DE PÁDUA**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 30 DE AGOSTO DE 2012.

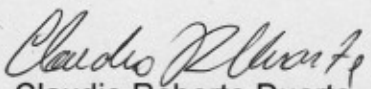
BANCA EXAMINADORA:


José Teixeira Freire
Orientador / UFSCar


Maria do Carmo Ferreira
UFSCar


Ronaldo Guimarães Corrêa
UFSCar


Rodrigo Béttega
UFU


Claudio Roberto Duarte
UFU

Dedico a tese ao amigo e professor,
José Teixeira Freire

Agradecimentos

Agradeço ao professor José Teixeira Freire a dedicação, orientação e ao apoio nas horas difíceis.

Ao professor Rodrigo Bettega a ajuda que me foi dada durante a ambientação com o software Fluent e pelas sugestões que obtive durante as simulações. Também à professora Cibele Souza Lopes pela vivência experimental a mim transmitida.

Agradeço as reuniões de grupo para apresentações de andamento ao conjunto de professores do centro de secagem DEQ-UFSCar: Ana Maria da Silveira, Dermeval José Mazzini Sartori, Fábio Bentes Freire, Maria do Carmo Ferreira e Ronaldo Guimarães Corrêa. Sem o acompanhamento do grupo meu trabalho teria sido mais difícil.

Agradeço aos meus pais a dedicação que tiveram na minha educação pessoal e o esforço que dispensaram para a minha educação formal. Também à Daniela Amorim Fontes, minha namorada para toda a vida, pelo amor, companheirismo e apoio.

Agradeço ao professor Roberto de Campos Giordano e ao professor Marcelo Perencin de Arruda Ribeiro por tudo que aprendi durante os anos que trabalhamos juntos.

Agradeço aos técnicos da oficina mecânica do DEQ-UFSCar, Adilson e Oscar, as horas de trabalho que dispensaram para que eu pudesse trabalhar.

Aos amigos do centro de secagem pelas horas de descontração e discussões construtivas traçadas.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

As distribuições radial e axial de material particulado grosseiro em trecho vertical com alimentação nesta mesma orientação são desconhecidas. Tendo em vista a importância desta configuração para aplicações de secagem e pré-aquecimento de sólidos na indústria, foi analisado o comportamento do escoamento gás-sólido em transporte pneumático diluído alimentado diretamente em trecho ascendente utilizando-se um dispositivo Venturi.

Para tanto, a tese apresenta simulações eulerianas com modelos baseados na teoria cinética granular do escoamento gás-sólido em um trecho vertical. Simulações com hipótese de simetria axial (bidimensionais) e tridimensionais foram realizadas. A razão mássica de carga utilizada nas simulações foi obtida em ensaios experimentais com transportador de mesmas dimensões que as simuladas.

Apesar de a simetria axial ser inválida para o alimentador em questão, as simulações bidimensionais foram realizadas com o objetivo de encontrar um padrão radial de escoamento para regiões que se afastassem da alimentação. No entanto, avaliou-se que a alimentação influía nos campos escalares de fração de sólidos das soluções numéricas para comprimentos relativamente longos. Assim, somente simulações tridimensionais puderam ser usadas para analisar o escoamento até a altura simulada para o alimentador em questão.

As simulações tridimensionais mostraram a existência de uma série de agrupamentos de sólidos ao longo do trecho ascendente. As condições para a formação desses agrupamentos originavam-se da própria alimentação de sólidos.

Na ausência de dados experimentais com relação aos detalhes da fluidodinâmica da fase sólida, foram obtidos resultados de pressão ao longo de um transportador pneumático para verificação experimental das simulações. O perfil de queda de pressão obtido na simulação tridimensional aproximou-se dos resultados experimentais. Além disso, o refinamento de malha reduziu os desvios comparativos de perda de pressão na alimentação. Devido à redução dos desvios experimentais, dois refinamentos de malha foram realizados. Ambos verificaram a formação de agrupamentos obtida com a malha grosseira.

Abstract

The radial and axial distributions of coarse solids when fed directly in a riser are unknown, despite this type of feeding is very important for drying and preheating of solids during conveying. In this context, this thesis focused on studying the diluted conveying of coarse solids in a riser that was fed by a Venturi feeder in vertical orientation.

Experiments were done with particles of 1mm averaged diameter conveyed in a riser (5.32cm of diameter) to obtain the mass loading ratio used in simulations. The assays also made pressure data available to verify the simulations.

Eulerian simulations using models based on kinetic granular theory were done. The main goal was to evaluate solids distribution in gas-solid flow for this type of system.

The 2D simulations were used to get a stable pattern downstream the feeder after the development length. However, the solid feeding structures generated near feeding percolated the entire riser and, as a consequence, there was no stable pattern. As a consequence, no pattern was found to represent solid phase behavior, since the axial symmetric assumption is invalid for the Venturi feeder. Therefore, only 3D simulations can be used to study asymmetric feeding for the conditions applied, even for a relatively long riser with small diameter.

Experimental pressure data was approximately predicted by 3D simulations and prediction was better as the mesh was refined. However, the refined meshes applied in shorter risers to decrease computational effort showed the same solid flow behavior that was seen in the coarser mesh.

The 3D simulations showed that there were clusters in the entire experimental riser. Moreover, clusters were generated by solid phase flow near feeding and some of them percolated the entire riser while mixing others. In addition, simulations showed that the bypass region on feeding is in the opposite side from feeding pipe.

Sumário

Resumo.....	II
Abstract.....	III
Lista de símbolos	VI
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tabelas	XIV
Lista de quadros.....	XV
1 Introdução e justificativas.....	1
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 O transportador pneumático de material granular.....	5
2.1.1 Constituição do transportador pneumático de sólidos	5
2.1.2 Leitos fluidizados circulantes: contextualização e terminologia	7
2.2 A alimentação de material particulado em corrente de gás.....	11
2.2.1 Alimentadores gravitacionais	12
2.2.2 Dispositivos mecânicos de alimentação	16
2.2.3 Aeração no conduto de alimentação: válvulas com aeração	17
2.2.4 Alimentador tipo jorro.....	19
2.2.5 Limitações do conhecimento sobre a alimentação de sólidos	20
2.3 Modelagem de escoamento multifásico: formulações e contextualização	21
2.4 Região de alimentação e desenvolvimento do escoamento: conhecimento experimental e CFD.....	26
2.5 Sumário e observações finais.....	28
3 Materiais e métodos.....	30
3.1 Ensaio experimentais.....	30
3.1.1 Aparato experimental.....	30
3.1.2 Instrumentação.....	36
3.1.3 Ensaio experimentais: procedimento.....	38
3.1.4 Tratamento e análise de dados experimentais.....	40
3.2 Ensaio computacionais	41
3.2.1 Geometria e malha computacional.....	41
3.2.2 Modelos e parâmetros físicos.....	48
3.2.3 Condições de contorno	56
3.2.4 Solução numérica	57

3.2.5	Análise de resultados do CFD	59
4	Resultados e discussões.....	62
4.1	Resultados experimentais	62
4.1.1	Condições experimentais.....	62
4.1.2	Apresentação dos resultados para ensaios experimentais sem material particulado	62
4.1.3	Apresentação dos resultados para ensaios experimentais com material particulado (1mm).....	67
4.1.4	Comparação entre os ensaios com e sem material particulado..	73
4.2	Ensaio computacionais do escoamento de ar em geometrias características do transportador de sólidos	74
4.2.1	Resultados gerais do escoamento monofásico.....	75
4.2.2	Verificação da estabilidade da malha.....	77
4.2.3	Simulação tridimensional do escoamento de ar: comparação com resultados experimentais	88
4.3	Simulações 2D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com geometrias características da alimentação de partículas.	91
4.3.1	Resultados de perda de pressão e verificação experimental.....	93
4.3.2	Fluidodinâmica das simulações 2D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente.....	95
4.4	Simulações 3D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com alimentador Venturi para baixas pressões.	100
4.4.1	Verificação experimental.....	102
4.4.2	Fluidodinâmica das simulações 3D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com alimentador Venturi	104
4.4.3	Verificação da fluidodinâmica das simulações 3D com malhas mais refinadas.....	117
4.4.4	Observações finais	125
5	Conclusões	126
5.1	Conclusões experimentais	126
5.2	Simulações 2D (simetria axial).....	126
5.3	Simulações 3D.....	127
	Sugestões para trabalhos futuros.....	129
	Referências bibliográficas	130
	Apêndice A – Manual de operações do programa de aquisição (versão 1.0).	135
	Apêndice B – Cálculos das estatísticas para perda de pressão dos ensaios experimentais.....	140
	Apêndice C – Infra-estrutura computacional	143

Lista de símbolos

D	Diâmetro da tubulação (diâmetro hidráulico)
D_s	Difusividade da fase particulada
D_f	Difusividade da fase fluída
d_s	Diâmetro de partícula
e_{ss}	Coefficiente de restituição do choque entre partículas
$G_{k,f}$	Geração de energia cinética turbulenta
$g_{0,ss}$	Função distribuição radial
\vec{g}	Gravidade (notação vetorial)
\bar{I}	Tensor unitário
$I_{t,f}$	Intensidade de turbulência da fase fluída
K_{fs} ou K_{sf}	Coefficiente de troca de momento entre as fases gás e granular
k_f	Energia cinética turbulenta da fase fluída (por unidade de massa)
k_{fs}	Covariância entre velocidades de flutuação das duas fases
L	Dimensão característica de comprimento da turbulência na fase fluída
$L_{t,f}$	Escala de comprimento da turbulência
p	Pressão
p_s	Pressão da fase granular
Re_f	Reynolds do fluido
Re_s	Reynolds para partícula
\vec{R}_{fs}	Força de interação (arraste) da fase fluída na sólida
\vec{R}_{sf}	Força de interação (arraste) da fase sólida na fluída
t	Tempo
\vec{v}_q	Velocidade da fase q (em notação vetorial)
\vec{v}_{fs}	Velocidade relativa
\vec{v}_{dr}	Velocidade drift devido à flutuações da fração volumétrica de fase

Letras gregas

α	Fração de fase sólida
α_q	Fração da fase q
ε_f	Dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de tempo e massa
η_{sf}	Razão entre os tempos característicos da interação vórtice-partícula
θ	Ângulo entre a velocidade média da partícula e a velocidade relativa
θ_s	Temperatura granular
λ_s	Viscosidade <i>bulk</i> da fase granular
$\mu_{f,t}$	Viscosidade turbulenta
μ_q	Viscosidade da fase q
$\Pi_{k,f}$	Influência da fase dispersa na energia cinética turbulenta da fase fluída
$\Pi_{f,k}$	Influência da fase dispersa em ε_f da turbulenta da fase fluída
ρ_q	Densidade da fase q
σ_{fs}	Número de Prandtl da dispersão
=	
τ_q	Tensor das tensões viscosas para fase q
=	
τ_f	Tensor das tensões de Reynolds do modelo de turbulência
$\tau_{F,sf}$	Tempo característico dos efeitos inerciais atuando sobre a partícula
$\tau_{t,sf}$	Tempo característico vórtice-partícula
$\tau_{t,f}$	Escala de tempo da turbulência
Ψ	Esfericidade da partícula

Subscritos

s	Fase sólida
f	Fase fluída
p	Partícula

Lista de figuras

Figura 2.1 – Diagrama de blocos representando um sistema de transporte pneumático (adaptado de Marcus et al., 1990).	6
Figura 2.2 – Diagrama de blocos representando um sistema de transporte pneumático com recirculação de sólidos (adaptado de Marcus et al., 1990).	7
Figura 2.3 - Diagrama de blocos representando a configuração de transportador circulante mais utilizada na fluidização rápida (leito fluidizado circulante, adaptado de <i>Grace et al., 1997</i>).....	8
Figura 2.4 – Diferentes orientações do dispositivo de alimentação. a – orientação horizontal do conduto de transporte na alimentação. b – orientação vertical do conduto de transporte na alimentação.	12
Figura 2.5 – Alimentadores com restrição tipo Venturi. A imagem apresenta os alimentadores na orientação horizontal. a – Venturi para alimentação em sistemas com baixa pressão. b – Venturi “comercial”.	14
Figura 2.6 – Dispositivos de alimentação utilizados por Lopes, 2007. (a) - sem restrição. (b) - com restrição abrupta. (c) – com restrição tipo Venturi.	15
Figura 2.7 – Desenho esquemático da válvula rotativa de alimentação de sólidos.	17
Figura 2.8 – Dispositivos de alimentação utilizados por <i>Kim et al. (2008)</i> . Adaptado de <i>Kim et al. (2008)</i> . a – ‘loop’ bloqueado. b – válvula J. c – válvula L.	18
Figura 2.9 – Desenho esquemático do alimentador tipo jorro.	19
Figura 3.1 – Desenho técnico do leito pneumático circulante (“loop” ou leito fluidizado circulante). Cotas em mm.	31
Figura 3.2 - Válvula guilhotina para manipulação da vazão de sólidos. Reproduzida de <i>Lopes (2011)</i> . a – válvula em perspectiva. b – válvula com abertura parcial. c – válvula totalmente aberta.	32
Figura 3.3 - Caixa de amostragem de sólidos presente no final do transportador.	33
Figura 3.4 – Desenho técnico do alimentador de sólidos utilizado. Tipo de alimentador: Venturi para baixas pressões. Peça construída em aço carbono. Cotas em mm.	34
Figura 3.5 – Início do transportador pneumático. ti representa as tomadas de pressão, fj as flanges para montagem do sistema e vk válvulas guilhotina para medida da porosidade do leito.	35
Figura 3.6 – Desenho esquemático mostrando o corte do plano yz no sistema em estudo. a – corte do trecho vertical. b – corte da dispositivo de alimentação (Figura 3.4).....	42
Figura 3.7 – Desenho esquemático mostrando o sistema computacional das simulações bidimensionais. a – transportador com dispositivo Venturi, dando	

destaque ao dispositivo para indicação da área de alimentação. b – transportador sem restrição.....	43
Figura 3.8 – Malha bidimensional para o caso com Venturi. a – proximidade da garganta do Venturi (região de junção dos condutos). b – proximidade da saída do trecho ascendente.....	45
Figura 3.9 – Malha de 2mm utilizada no sistema tridimensional. a – região próxima à junção dos condutos. b – malha para a superfície de contato entre o cone divergente e o trecho vertical. c – malha para a superfície de contato da junção dos condutos com o cone divergente do alimentador.....	46
Figura 3.10 - Campos escalares de fração de sólidos obtidos por simulações na região próxima à alimentação na garganta de um dispositivo Venturi. a – caso com simetria. b – caso tridimensional (superfície S_y).	49
Figura 4.1 – Dados de pressão obtidos nos ensaios experimentais realizados sem material particulado. a – pressão em função da tomada da pressão. b - perda de pressão em função de L. As linhas ligam as médias em cada posição.	63
Figura 4.2 – Pressão e queda de pressão em função da tomada da pressão para os ensaios experimentais realizados sem material particulado: gráficos individuais para cada velocidade nominal. As linhas ligam as médias em cada posição.....	64
Figura 4.3 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados sem material particulado. a – todas as condições experimentais. b – condições de 22 e 29,5m/s.....	65
Figura 4.4 – Dados de perda de pressão em função de L com os ajustes lineares para diferentes trechos no transportador na velocidade nominal de 29,5m/s.	67
Figura 4.5 – Vazão de sólidos em função da velocidade do ar nos ensaios, barras de erros representam intervalo de confiança de 95%. a – velocidade média dos ensaios. b – velocidade adimensionalizada pela velocidade terminal (correlação de <i>Pettyjohn e Christiansen, 1948</i>).....	68
Figura 4.6 – Pressão e perda de pressão em função da tomada da pressão nos ensaios com material granular. Traços ligam os valores médios de pressão em cada posição.	70
Figura 4.7 – Pressão e perda de pressão em função da tomada da pressão nos ensaios com material granular em linha. Cada velocidade nominal de ar apresentada em separado.....	71
Figura 4.8 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados com material particulado. a – todas as condições experimentais. b – condições de 22 e 29,5m/s de velocidade nominal.....	72
Figura 4.9 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados com e sem material particulado.....	74
Figura 4.10 – Campo vetorial de velocidade para a superfície S_y do escoamento de ar no alimentador Venturi. b – foco na saída do alimentador. .	75

Figura 4.11 – Resultados da simulação para a velocidade em z. a - campo escalar v_z . b - v_z em função de y (direção secundária) para diversas posições em z na superfície S_y	76
Figura 4.12 – Resultados da simulação para a energia cinética turbulenta. a - campos escalares. b -energia cinética turbulenta em função de y para diversas posições em z na superfície S_y	76
Figura 4.13 – Perda de pressão em função de L para o <i>trecho ascendente</i> obtida em simulação bidimensional e tridimensional do alimentador Venturi. ...	77
Figura 4.14 – Perda de pressão em função de L para o <i>trecho ascendente</i> obtida a partir de simulação bidimensional de um dispositivo Venturi com mesmas dimensões do alimentador em estudo com diferentes refinamentos de malha.	78
Figura 4.15 - Perda de pressão em função de L obtida em simulação 2D com diferentes refinamentos de malha para o <i>trecho ascendente - foco no trecho do dispositivo Venturi</i>	79
Figura 4.16 – Módulo da velocidade do ar em função da posição radial para escoando em <i>trecho ascendente</i> com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D. a – perfis no segmento de reta G_y . b – perfis no segmento de reta Cy_1	79
Figura 4.17 - Energia cinética turbulenta em função da posição radial para escoamento do ar em <i>trecho ascendente</i> com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D. a – perfis no segmento de reta G_y . b – perfis no segmento de reta Cy_1	80
Figura 4.18 - Energia cinética turbulenta em função da posição radial no segmento de reta Cy_2 para o escoamento do ar em <i>trecho ascendente</i> com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D.	81
Figura 4.19 – Perda de pressão no eixo central em função de L para simulação 3D de um dispositivo Venturi (sem lateral) em <i>trecho ascendente</i> . Apresentação de diversos refinamentos de malha e comparação com a solução da simulação 2D com malha de 1mm. b – apresenta aproximação maior para região próxima a garganta.	82
Figura 4.20 - Módulo da velocidade do ar em função da coordenada y para o escoando em <i>trecho ascendente</i> com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações tridimensionais e da simulação 2D com malha de 1mm. a – perfis no segmento de reta G_y . b – perfis no segmento de reta Cy_1	83
Figura 4.21 - Energia cinética turbulenta em função da coordenada y para o escoamento do ar em <i>trecho ascendente</i> com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulação 3D e da simulação 2D com malha de 1mm. a – perfis no segmento de reta G_y . B – perfis no segmento de reta Cy_1	83
Figura 4.22 - Perda de pressão no eixo central em função de L para a simulação 3D do alimentador Venturi em <i>trecho ascendente</i> . Apresentação de diversos refinamentos de malha. b – apresenta aproximação maior para região próxima à garganta.	85

Figura 4.23 - Módulo da velocidade do ar em função da coordenada y para o escoando em <i>trecho ascendente</i> com alimentador Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 3D. a – perfis no segmento de reta Gy. b – perfis no segmento de reta Cy1.	86
Figura 4.24 - Energia cinética turbulenta em função da coordenada y para o escoamento do ar em <i>trecho ascendente</i> com alimentador Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulação 3D. a – perfis no segmento de reta Gy. B – perfis no segmento de reta Cy1.....	86
Figura 4.25 - Perda de pressão no eixo central em função de L para a simulação 3D do alimentador Venturi em <i>trecho ascendente</i> para diferentes aproximações do termo convectivo para k. Apresentação das malhas baseadas em 2mm e 1,2mm.	87
Figura 4.26 – Perda de pressão em função de L. Resultados da solução para o eixo central com diversos refinamentos de malha da simulação 3D com aproximação de segunda ordem para k e dados experimentais. a – todo trecho ascendente simulado. b – maior enfoque na região próxima à alimentação....	88
Figura 4.27 – Perda de pressão em função de L para simulações utilizando aproximação de primeira ordem para k em diversos refinamentos de malha e dados experimentais.	89
Figura 4.28 - Perda de pressão em função de L no <i>trecho ascendente</i> das simulações 2D do escoamento bifásico e dados experimentais. a – caso sem restrição. b – caso com restrição. A figura mostra também os resultados de queda de pressão para simulações de escoamento monofásico de ar em dispositivo Venturi (sem lateral).....	93
Figura 4.29 - Campos escalares para a fração de sólido das simulações. a – caso sem restrição. b – caso com restrição.	95
Figura 4.30 - Fração de sólidos em função da posição radial em diferentes distâncias da alimentação. a – caso sem afunilamento. b – caso com afunilamento. Coeficiente de especularidade nulo.....	97
Figura 4.31 - Fração de sólidos em função da posição radial para diferentes distâncias da alimentação. a – caso sem afunilamento. b – caso com afunilamento. Coeficiente de especularidade 0,2.....	98
Figura 4.32 - Desenvolvimento das bolhas no sistema a partir da alimentação de sólidos com restrição para a simulação 2D até 0,45m de comprimento do trecho ascendente. Coeficiente de especularidade nulo. Legendas na parte superior indicam evolução temporal a partir da imagem à esquerda. Referência dos instantes de tempo em 9s.....	99
Figura 4.33 – Perda de pressão da simulação para o escoamento gás-sólido no eixo do trecho ascendente com alimentador Venturi de simulação 3D. Casos com coeficientes de especularidade diferentes.....	101
Figura 4.34 - Perda de pressão experimental e das simulações com diversos refinamentos de malha do escoamento gás-sólido no eixo do sistema simulado em 3D com alimentador Venturi. b – apresenta enfoque maior na região próxima à alimentação.	102
Figura 4.35 – Campos escalares da fração de sólidos ao longo do tempo para a	

superfície Sy até 0,3m de altura do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	105
Figura 4.36 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	106
Figura 4.37 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	108
Figura 4.38 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	110
Figura 4.39 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy até a altura 1,24m do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	111
Figura 4.40 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy até 1,17m de altura do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.	112
Figura 4.41 – Detalhes da formação do agrupamento da Figura 4.39: campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy entre a saída do alimentador e 1,6m do trecho ascendente.	113
Figura 4.42 – Campo escalar da fração de sólidos na superfície Sy para todo o trecho ascendente ao longo do tempo. Os tracejados acompanham o avanço do agrupamento formado conforme mostra a Figura 4.39 até próximo a saída do <i>trecho ascendente</i>	114
Figura 4.43 – Campo escalar da fração de sólidos na superfície Sy e aproximações de uma região do trecho ascendente em 9,1 segundos de escoamento.	115
Figura 4.44 – Campo escalar da fração de sólidos para superfícies do tipo Sz em 9,1 segundos de escoamento.	116
Figura 4.45 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy para todo o trecho ascendente. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	118
Figura 4.46 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy até 0,85m do trecho ascendente. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	119
Figura 4.47 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy para todo o trecho ascendente. Destaque dado aos agrupamentos formados no sistema antes de 0,15s. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	120
Figura 4.48 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	121
Figura 4.49 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	122

Figura 4.50 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy em 9,25 segundos. Malha de 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo. a – trecho ascendente e regiões em destaque. b – superfícies do tipo Sz.	122
Figura 4.51 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy – trecho ascendente completo. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.	123
Figura 4.52 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 1,2mm e coeficiente de especularidade nulo.	124
Figura 4.53 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 1,2mm e coeficiente de especularidade nulo.	124

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Posições de medida da pressão e comprimento percorrido na direção do escoamento (L) relacionado a cada posição das tomadas de pressão. O comprimento foi calculado ao considerar o t1 como referência (marco zero).....	36
Tabela 3.2 – Número de células utilizadas nas simulações bidimensionais.....	45
Tabela 3.3 – Características das malhas tridimensionais utilizadas nas simulações do escoamento bifásico, comprimento do trecho vertical simulado e tempo computacional para cada simulação (taxa de evolução).....	48
Tabela 3.4 – Parâmetros físicos das simulações.....	56
Tabela 3.5 - Deslocamento de cada segmento de reta a partir da saída do tronco de cone de saída da peça de alimentação e a partir do t1. w representa ou x ou y.....	60
Tabela 4.1 – Média e desvio padrão de variáveis relevantes dos ensaios experimentais realizados.....	62
Tabela 4.2 – Valores do coeficiente de explicação (R^2) para o modelo linear de $\square P$ em função de L nos diferentes trechos sob análise para determinação da linearidade.....	66
Tabela 4.3 – Perda de pressão por comprimento no trecho linear. Ajuste da reta para o trecho de t4 a t9 para ensaios sem particulado. Sendo n é o número total de amostras de pressão utilizadas no ajuste linear.....	67
Tabela 4.4 – Valores do coeficiente de explicação (R^2) para o modelo linear de $\square P$ em função de L nos diferentes trechos sob análise para determinação da linearidade.....	73
Tabela 4.5 – Perda de pressão por comprimento no trecho linear. Ajuste da reta para o trecho de t4 a t9 para ensaios com particulado. Sendo n é o número total de amostras utilizadas no ajuste linear.....	73
A estimativa de perda de pressão na região linear foram -181Pa/m para o coeficiente nulo e -209Pa/m para o valor de 0,2. Os dados experimentais forneceram estimativa de $-149,4 \pm 8,8$ (intervalo de confiança para 95% de confiança da Tabela 4.6).	103

Lista de quadros

Quadro 3.1 - Modelo geral do escoamento bifásico gás-sólido (balanço de massa e momento).....	50
Quadro 3.2 - Modelo para o arraste entre fases utilizado (<i>Wen & Yu, 1966</i>).	51
Quadro 3.3 – Modelo para a viscosidade granular (<i>Gidaspow et al., 1992</i>).....	53
Quadro 3.4 – Modelo para turbulência da fase contínua.	54
Quadro 3.5 – Modelo de turbulência para fase dispersa.	55

1 Introdução e justificativas

Muitos esforços em pesquisa têm sido realizados com a finalidade de ampliar o conhecimento a cerca do escoamento gás-sólido em trecho ascendente para aplicações como reator catalítico ou na indústria de geração de energia (*Gidaspow, 1994; Gungor e Eskin, 2008*).

O exemplo mais notório de tais aplicações é a utilização como reator de craqueamento catalítico de petróleo (*Fluid catalytic cracking, FCC*), em que o craqueamento ocorre em um ciclo fechado de realimentação de sólidos em configuração conhecida como leito fluidizado circulante (*Circulating Fluidized Bed, CFB*).

As aplicações mais convencionais do CFB utilizam particulado fino (60 a 80 μ m) em fluidização de regime denso (fluidização rápida).

O CFB não tem sido utilizado para secagem de materiais (*Grace et al., 1997*) e a aplicação mais proeminente do transporte pneumático na secagem parece ser a secagem por passagem rápida (flash drying, *Rajan et al., 2008b*).

Assim, o transporte pneumático tem sido estudado como uma alternativa para secagem e pré-aquecimento de sólidos (*Narimatsu et al., 2007; Rajan et al., 2008a; Rajan et al., 2008b; Sousa et al., 2010*). Uma das vantagens associadas a ele é que os produtos ou matérias primas são secos e aquecidos enquanto transportados ao seu destino.

Estas aplicações trazem o foco ao transporte diluído de material particulado grosseiro (maiores que 500 μ m) e fino em trecho ascendente, por exemplo, para secagem de grãos ou fármacos (*Rajan et al., 2010*). No entanto, não foram encontrados estudos sobre a distribuição de material particulado, principalmente grosseiro, em secadores deste tipo.

A maioria dos estudos relacionados ao transporte pneumático de material grosseiro não utiliza configurações de equipamento próprias à secagem de materiais. Ao contrário, o enfoque da maioria desses trabalhos está em aplicações somente para o transporte de material em escoamento livre.

Nestes casos o transporte pneumático ocorre essencialmente em trechos horizontais e conseqüentemente a alimentação de sólidos ocorre nesta orientação do conduto de transporte.

Muito do que se conhece sobre a distribuição de material granular no

transporte diluído horizontal está sintetizado em *Fokeer et al. (2004)*.

O transporte pneumático de materiais granulares utiliza curvas para redirecionar o escoamento gás-sólido e, portanto, conduzir as partículas ao seu destino (*Marcus et al., 1990*). Assim, estudos do comportamento em curvas são realizados com frequência.

Uma curva é utilizada frequentemente como entrada do trecho ascendente para transporte na vertical. *Zhu et al. (2003)* e *Vashisth & Grace (2012)*, entre outros, apresentaram estudos sobre a formação de escoamento tipo corda (“*rope formation*”, ou “*rope-like structures*”) em trecho ascendente com alimentação a partir de uma curva e sua posterior dissipação.

Alternativamente, sólidos podem ser alimentados com o conduto em orientação vertical quando o transporte ocorre essencialmente nessa direção. Alimentações deste tipo são comuns nos CFBs e vêm sendo propostos para aplicações em secagem (*Grbavcic et al., 2006; Sousa et al., 2010; Lopes et al., 2011*).

Lopes et al. (2011) apresentou dados experimentais de um dispositivo de alimentação tipo Venturi para trecho ascendente operando em baixas pressões positivas (pressões menores que um bar gauge).

Este mesmo dispositivo pode ser usado para alimentação de materiais de diversos diâmetros, incluindo particulado fino. Este alimentador é comum na orientação horizontal (*Mills, 2004*) e sua utilização tem por objetivo evitar o desvio da corrente de gás pelo conduto de alimentação.

A alimentação na vertical deve reduzir a perda de carga, atrito e conseqüentemente a degradação das partículas por abrasão, uma vez que reduz uma curva no transportador.

A alimentação na vertical também poderia levar à maior homogeneidade da secagem no sistema, pois o transporte na horizontal leva ao acúmulo de partículas na parte inferior do conduto (*Fokeer et al., 2004*) e a curva para entrada no trecho ascendente promove acúmulo de sólidos em escoamento tipo corda. Entretanto, não existem informações sobre a distribuição de sólidos grosseiros em trecho ascendente para alimentação na vertical.

A curva como entrada do trecho ascendente a partir da alimentação na horizontal costuma ser muito próxima da própria injeção de sólidos na corrente gasosa (*Rajan et al., 2008a; Rajan et al., 2008b*). Esta característica ressalta

ainda mais as desvantagens desse tipo de alimentação em relação à homogeneidade da secagem pelos efeitos da curva e a coloca como um desperdício de energia desnecessário no sistema.

Além da estrutura de escoamento em todo o equipamento poder ser alterada pela alimentação (*You et al., 2009*), o método de alimentação vincula-se tanto com a viabilidade técnica como econômica dos transportadores (*Marcus et al., 1990, Lopes et al., 2011; Arastoopour, 1986; Costa et al, 2004; Kim et al., 2008*).

Tendo todo este cenário em mente, o objetivo desta tese foi o de analisar o comportamento do escoamento gás-sólido para um trecho ascendente com alimentação em orientação vertical.

Nos casos com escoamento diluído de particulado grosseiro, medidas experimentais ainda são mais difíceis de serem obtidas. *Zhu et al. (2003)* utilizaram medidas de eletro capacitância para estudar o escoamento gás-sólido de material grosseiro em trecho ascendente vindo de uma curva. Apesar de quantificarem bem o escoamento em regime denso, eles não conseguiram quantificar em intervalos de tempo discretos o transporte diluído.

As dificuldades com relação às medidas experimentais do detalhamento do escoamento nestes tipos de sistemas ampliam a importância da fluidodinâmica computacional (CFD) na compreensão e estudo destes equipamentos.

Além das contribuições com relação ao conhecimento da fluidodinâmica no trecho ascendente, o projeto e escalonamento de secadores devem se beneficiar com a obtenção de simulações confiáveis, especialmente porque boa parte do processo de secagem ocorre na própria região de alimentação. Assim, as taxas de secagem dependem do escoamento gás-sólido na região.

Nesta tese procurou-se, portanto, utilizar simulações bidimensionais (hipótese de simetria axial) e tridimensionais para descrever o comportamento da fase sólida em escoamento em trecho ascendente com alimentação na vertical a partir de um dispositivo Venturi similar ao apresentado por *Lopes et al. (2011)*. Condições comuns à secagem, incluindo particulado grosseiro (1mm para 53,2mm de tubulação) foram avaliadas.

A simetria axial foi utilizada de modo similar às simulações de *You et al. (2009)* para tentar analisar a estrutura radial em comprimentos distantes da

alimentação. Assim, a não validade da simetria na região de entrada de sólidos não faria diferença, pois a alimentação não mais influiria no escoamento. Entretanto, observou-se que somente a simulação tridimensional pode ser utilizada para prever a distribuição de sólidos no sistema devido à não dissipação da influência da entrada.

O comportamento fluidodinâmico obtido a partir das simulações 3D foi analisado e na ausência de medidas detalhadas com relação ao escoamento da fase sólida no sistema, utilizaram-se dados de pressão na direção axial para verificação experimental.

2 Revisão bibliográfica

2.1 O transportador pneumático de material granular

O transportador pneumático realiza a movimentação do material granular por arraste em uma corrente de gás, a distâncias horizontais ou verticais (Perry, 1999).

O transporte de particulado por arraste em gás é largamente utilizado na produção e comercialização de produtos a nível mundial e deve ser encarado como a alternativa preferencial para o transporte de sólidos devido às vantagens que oferece, entre elas: flexibilidade, baixo impacto ambiental, baixo custo de manutenção e facilidade de automação e controle (Marcus *et al.*, 1990).

Assim, esse tipo de sistema é responsável pelo transporte de grande variedade e quantidade de materiais. Marcus *et al.* (1990) traz uma lista de aproximadamente 180 materiais que, apesar de limitada, fornece uma idéia da amplitude econômica dos transportadores pneumáticos. A lista inclui grãos, minérios, produtos da indústria química e alimentícia.

Apesar das vantagens, o transportador pneumático pode também envolver elevado consumo energético, abrasão e desgaste, entupimento, além de o projeto equivocado do sistema poder ocasionar degradação das partículas.

Neste âmbito destaca-se que, apesar de sua importância, a seleção e projeto dos transportadores pneumáticos são complexos e comumente realizados de modo arbitrário e pouco científico (Marcus *et al.*, 1990).

Apesar dos recentes desenvolvimentos da fluidodinâmica computacional, o projeto de transportadores ainda é comumente realizado de modo empírico e por escalonamento (Mills, 2004; Ratnayake, 2005; Milioli, 2006). A fluidodinâmica computacional é, portanto, subutilizada no projeto deste tipo de sistema.

2.1.1 Constituição do transportador pneumático de sólidos

A Figura 2.1 apresenta o desenho esquemático de um transportador

pneumático, em que se observam essencialmente quatro secções, ou zonas, (Marcus et al., 1990): alimentação de gás, alimentação de sólidos, transporte e separação.

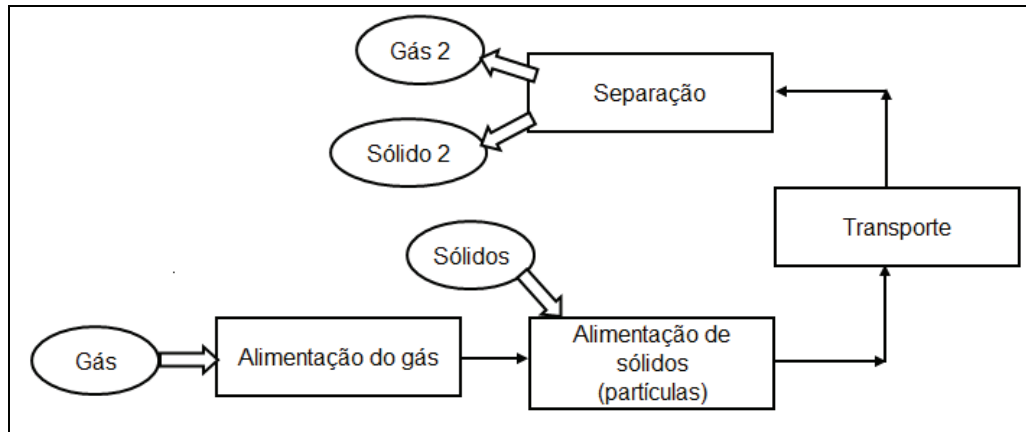


Figura 2.1 – Diagrama de blocos representando um sistema de transporte pneumático (adaptado de Marcus et al., 1990).

Existem diversos equipamentos para alimentação do gás: compressores, ventiladores, bombas a vácuo. A escolha do equipamento e de sua potência dependem do intervalo de vazão e pressão de operação.

A secção de transporte abrange toda tubulação em que a mistura gás-sólido será conduzida, enquanto a separação gás-sólido pode ocorrer em diversos equipamentos, entre eles os ciclones e os filtros.

Na secção de alimentação ocorre a mistura das partículas sólidas e da fase fluída, o que acarreta grande variação no momento (*momentum*) das fases. Associada à turbulência e geometria no ponto de mistura, a variação de momento das fases gera elevada queda de pressão (Marcus et al., 1990, Lopes, 2007).

A alimentação também pode ocasionar a restrição da vazão máxima de alimentação a valores relativamente baixos e alterar a estabilidade operacional do sistema de transporte (Ferreira, 1991; Arastoopour, 1986), podendo até mesmo inviabilizar a operação do transportador devido ao entupimento.

Em termos de projeto é importante que na alimentação dos sólidos a velocidade do ar seja suficiente para manter o escoamento e a pressão deve ser a necessária para vencer a perda de carga a jusante (Mills, 2004), que é uma composição da perda de carga de ambas as fases.

Deste modo, esta secção vincula-se com a viabilidade técnica e econômica dos transportadores pneumáticos (Arastoopour, 1986 e Ferreira, 1991; Marcus et al., 1990).

Quando se utiliza o transportador pneumático, em fase densa ou diluída, para transformação da matéria (como operação unitária, por exemplo, em secagem), grande parcela dos fenômenos relevantes ao processo (como a transferência de massa e reação em reatores catalíticos) ocorre na secção de alimentação (You et al, 2009), o que amplia a importância de seu estudo. Neste caso, são mais comuns os transportadores verticais (ou em trecho ascendente), seja esta transformação realizada no fluido ou nas partículas (vide leito fluidizado circulante na seção 2.1.2).

A importância da alimentação na operação e projeto tanto de transportadores pneumáticos como de outros equipamentos, a exemplo do leito fluidizado circulante, coloca esta secção da operação dos sistemas que operam com mistura gás-sólido como um ponto chave para o desenvolvimento científico e tecnológico da área.

2.1.2 Leitos fluidizados circulantes: contextualização e terminologia

A configuração de transportador circulante ou realimentado (*closed loop system*) é obtida quando sólidos vindos de um trecho de transporte são separados do gás e realimentados ao sistema, como mostra a Figura 2.2.

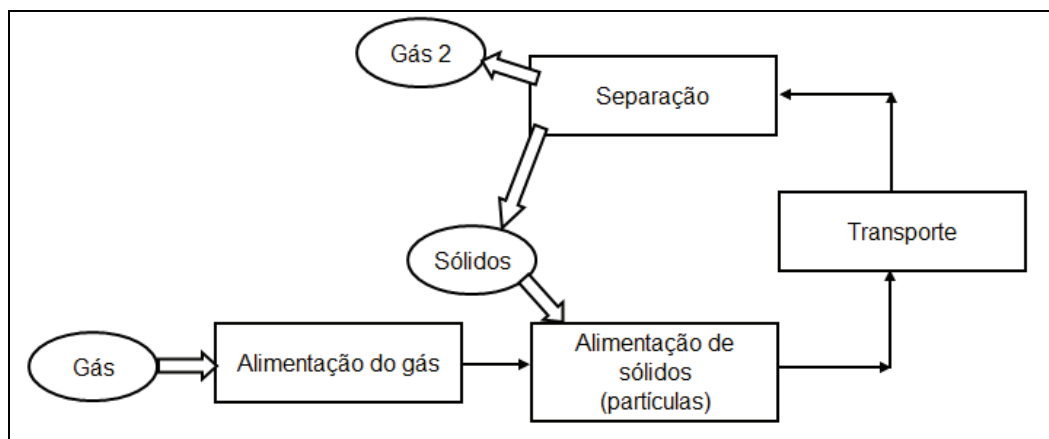


Figura 2.2 – Diagrama de blocos representando um sistema de transporte pneumático com recirculação de sólidos (adaptado de Marcus et al., 1990).

Quando a razão mássica entre a vazão de sólidos e do fluido aumenta no

escoamento multifásico diluído em trecho ascendente (“coluna” ou *riser*), o escoamento disperso colapsa e a fase densa se forma na região inferior da coluna, enquanto material particulado continua sendo transportado através do conduto. À medida que migramos para regiões superiores da coluna, a fase sólida se torna mais diluída.

Neste caso, o regime de escoamento recebe o nome de ‘fluidização rápida’ (*fast fluidization*).

O termo ‘rápida’ refere-se à velocidade superficial adquirida pelo gás na fluidização dos sólidos, que é muito superior à de mínima fluidização e suficiente para transportar material sólido para fora da coluna.

A fluidização turbulenta também é considerada como regime de fluidização em altas velocidades (*Grace et al., 1997*), mas nela não ocorre transporte considerável de sólidos ao longo do conduto de transporte.

Este tipo de fluidização é comumente observado quando partículas *tipo A* de Geldart (particulado fino, *Geldart, 1973*) são utilizadas.

A configuração de fluxos no sistema de transporte de sólidos mais comum para operação em fluidização rápida está representada pelo diagrama de blocos da Figura 2.3.

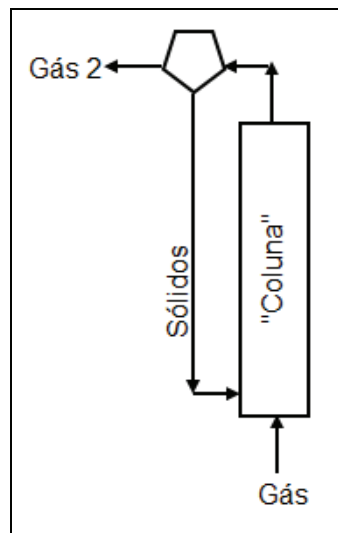


Figura 2.3 - Diagrama de blocos representando a configuração de transportador circulante mais utilizada na fluidização rápida (leito fluidizado circulante, adaptado de *Grace et al., 1997*).

Como os sólidos são transportados para fora da coluna, eles são realimentados próximo à base da mesma. Deste modo, mantém-se a vazão de

sólidos que percola o trecho ascendente e conseqüentemente o regime de fluidização do escoamento gás-sólido.

O nome mais utilizado para esta configuração (Figura 2.3) é 'leito fluidizado circulante' (*CFB, Circulating Fluidized Bed*).

O termo 'Leito fluidizado' refere-se à suspensão dos sólidos pelo gás, embora o escoamento denso na parte inferior do leito não apresente superfície superior bem definida. Deste modo, não se caracteriza de fato um leito, como ocorre no caso do leito fluidizado em regime de bolhas, por exemplo.

Apesar desta controvérsia, a denominação 'leito fluidizado rápido' foi adotada para distinguir as características da fluidização em questão do leito fluidizado utilizado anteriormente (operando em regime de fluidização em bolhas ou livre de bolhas), como destaca *Grace et al. (1997)*.

A utilização de CFBs torna-se mais rentável em processos que exijam a transformação de grandes quantidades de material, de modo a compensar custos adicionais do sistema (*Grace et al., 1997*).

Os leitos fluidizados circulantes, operando em regime de fluidização rápida, têm sido extensivamente utilizados e estudados, pois um nicho de processos de transformação química se beneficia largamente de suas vantagens, entre elas: alta superfície de contato gás-sólido, grande mistura de fases, tempos de residência intermediários ao transporte pneumático diluído e ao regime turbulento de fluidização e altas taxas de transferência de massa e calor. No entanto, aplicações relevantes ainda não foram encontradas em transformações físicas, como a secagem (*Grace et al., 1997*).

O termo *CFB* descreve o sistema em termos do sentido dos fluxos envolvidos na operação (presença da realimentação), como descrito por *Grace et al. (1997)*. Deste modo, ele substitui a expressão 'transportador pneumático circulante' (utilizada no início desta sessão) para casos em que o escoamento gás-sólido ocorre principalmente para trechos verticais.

O *CFB* pode operar em regime diluído (ou transporte diluído de sólidos), que é o regime tratado, por exemplo, por *Wilde et al. (2005)*. Entretanto, as aplicações do *CFB* em regime de fluidização rápida são tão importantes que na literatura comumente se utiliza *CFB* apenas para referir-se ao sistema operando em regime denso. Modo como é tratado, por exemplo, por *Kim et al. (2008)*.

O tipo de fluidização é citado explicitamente apenas quando estritamente necessário para a compreensão das discussões (como em *Du et al., 2004*).

Deste modo, em cada trabalho o regime é de fato definido pelas discussões e parâmetros operacionais do sistema.

Outras vezes, o termo diluído é omitido e transporte pneumático (*pneumatic conveying*) passa a ser utilizado como sinônimo do regime diluído em contraposição ao *CFB* (em regime de fluidização rápida).

Evitando mais discussões do gênero e com o objetivo de manter a clareza, o equipamento utilizado neste doutorado foi denominado transportador circulante de sólidos ou leito fluidizado circulante (*CFB*) em toda a tese e indistintamente.

O regime de operação tratado na tese foi o diluído, ou transporte pneumático diluído de sólidos, para todas as condições como será apresentado na seção 4.1.

O regime de fluidização geralmente estará implícito pelo contexto da discussão na tese e será explicitado somente quando necessário, principalmente ao citar resultados de outros trabalhos em regimes distintos.

Apesar da fluidização rápida ou qualquer outro regime de operação em leito fluidizado circulante ainda não ser extensivamente utilizado para aplicações em secagem (*Grace et al., 1997*), o regime diluído de escoamento gás-sólido foi descrito como sendo uma alternativa à secagem de diversos materiais, principalmente fármacos, alimentos e grãos, além de pastas por recobrimento de material inerte (*Narimatsu et al., 2007; Rajan et al., 2010*).

Diversas configurações de equipamento foram propostas para aplicação do transporte pneumático na secagem e pré-aquecimento de sólidos.

Souza et al. (2010) utilizaram alimentação tipo jorro em transporte pneumático ascendente e analisaram o comportamento térmico e fluidodinâmico do sistema frente à injeção de água. Este mesmo sistema, operando sem a injeção de água, foi analisado em relação à transição de regime para escoamento gás-sólido com partículas grosseiras por *Costa et al. (2004)*.

Um sistema similar foi também utilizado por *Grbavcic et al. (2006)* para analisar a transição de regime com particulado grosseiro.

Rajan et al. (2008a) e *Rajan et al. (2008b)* analisaram o comportamento

térmico do transporte em trecho ascendente. O alimentador utilizado era do tipo Venturi, mas de orientação horizontal e a mistura gás-sólido era conduzida ao trecho vertical através de uma curva.

Lopes et al. (2011) analisaram o comportamento da pressão para dois diferentes alimentadores de partículas grosseiras com restrição à passagem de ar no conduto de transporte vertical. Os resultados foram comparados com a alimentação sem dispositivos restritivos. Além disso, o trabalho avaliou o efeito da alteração da vazão de ar sobre a vazão de sólidos.

Como já foi dito na introdução, poucas informações são encontradas em relação à alimentação de material particulado grosseiro em trecho vertical, principalmente no que tange à distribuição de sólidos ao longo do sistema de transporte.

Apesar da aplicação mais proeminente na secagem ser a secagem rápida (flash drying, *Rajan et al., 2008b*), em que os sólidos seguem no transportador para posterior armazenagem, equipamentos em configuração para recirculação de sólidos similares aos utilizados em aplicações convencionais de CFB são utilizados para estudar a secagem no transporte pneumático.

Esta configuração não necessariamente procura viabilizar o CFB para a secagem. Pelo contrário, muitas vezes sua utilização visa à tão somente facilitar a configuração para estudos em escala de laboratório e piloto.

2.2 A alimentação de material particulado em corrente de gás

A literatura apresenta uma série de alternativas de dispositivos de alimentação (*Mills, 2004; Marcus et al., 1990*), com diferentes princípios de funcionamento.

Como este trabalho trata da região de alimentação, mistura e aceleração de sólidos, alguns destes dispositivos serão apresentados aqui com o objetivo de contextualizá-los. Antes disso, faz-se necessária a introdução de alguns termos e definições que serão utilizados.

As partículas são geralmente inseridas a partir de um reservatório em corrente fluída pela canalização por um conduto de alimentação (geralmente de secção circular). A corrente gasosa que recebe os sólidos será denominada corrente principal ou de transporte.

O conduto de alimentação será também denominado conduto lateral. O conduto em que o escoamento gás-sólido ocorre será denominado “conduto de transporte”, ou somente “conduto principal”. O conduto principal também costuma possuir secção circular.

2.2.1 Alimentadores gravitacionais

A utilização da própria força peso para inserção de sólidos em corrente fluída é largamente utilizada (Lopes, 2007; Marcus et al., 1990).

A conexão direta do conduto de alimentação com o conduto de transporte será denominada neste trabalho de alimentação *puramente* gravitacional (ou sem restrição) e está esquematizada na Figura 2.4.

O alimentador gravitacional (com ou sem restrição) pode ser inserido em um transportador (conduto) com orientação horizontal ou vertical (Figura 2.4). Também é comum a inclusão de dispositivos de controle, ou aeração secundária (seção 2.2.3), ou dispositivos mecânicos (seção 2.2.2).

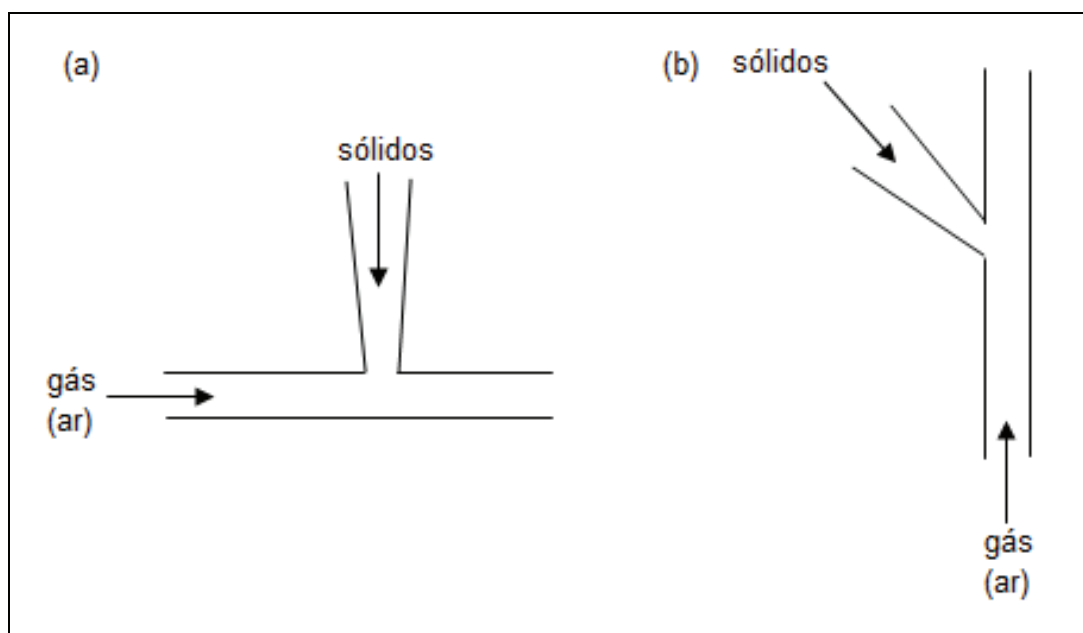


Figura 2.4 – Diferentes orientações do dispositivo de alimentação. a – orientação horizontal do conduto de transporte na alimentação. b – orientação vertical do conduto de transporte na alimentação.

A alimentação em transportadores industriais é usualmente realizada em trecho horizontal, como foi observado em Mills (2004) e Marcus et al. (1990). Entretanto, grande parte dessas aplicações trata do transporte essencialmente

horizontal, em que a maior parte da perda de pressão ocorre em trechos retos e horizontais. Esta orientação costuma ser diferente em leitos fluidizados circulantes operando em regime denso ou diluído (como apresentado na seção 2.2.3).

Mills (2004) destacou que o principal problema da alimentação de material particulado em transportadores sob pressões positivas é o gradiente de pressão adverso à entrada de material, que por sua vez gera desvio de ar a partir do conduto de transporte.

O desvio de gás através do conduto de alimentação representa perda de energia no sistema de transporte, uma vez que equipamentos de alimentação de ar devem ser dimensionados para prever a vazão de ar perdida.

Além disso, o escape de ar pode impossibilitar a alimentação em certos dispositivos, devido ao escoamento adverso à entrada de material sólido representar resistência ao escoamento granular no conduto de alimentação e à redução na vazão de ar para o transporte pneumático poder levar ao bloqueio no trecho de alimentação do transportador.

Problemas com o desvio da corrente de ar para transporte restringem a aplicação de alimentadores puramente gravitacionais, pois diminuem a faixa de operação da vazão de ar em que o transportador pode operar (*Costa et al., 2004*), ou mesmo impedem o funcionamento (*Lopes, 2007*). Além disso, ocorre grande desperdício de energia, uma vez que grande parte do ar é perdida já na entrada do sistema.

Quando material granular de esfericidade próxima à unidade e grosseiro é utilizado o problema do desvio se agrava, uma vez que a porosidade do corpo granular que se forma no conduto de alimentação é maior, garantindo maior permeabilidade.

Costa et al. (2004) e *Lopes (2011)* utilizaram a queda de pressão obtida no conduto de alimentação para estimar a quantidade de ar perdida pela lateral através da equação de Forchheimer em alimentador puramente gravitacional com particulado grosseiro. Através do cálculo concluíram que a vazão desviada é menos de 1% da vazão total e, portanto, desprezada na análise da fluidodinâmica do leito.

A utilização de restrição ao escoamento principal é uma das estratégias

adotadas para reduzir o problema de desvio da corrente de ar. A utilização de restrição ao escoamento principal (do conduto de transporte) será denominada aqui de alimentação gravitacional com restrição, independentemente do tipo de restrição utilizada.

Marcus et al. (1990) destacaram que o alimentador tipo Venturi, ou seja, a ação gravitacional para descarga de sólidos em um dispositivo Venturi, que atua como restrição ao escoamento principal, é frequentemente encontrado em sistemas industriais de transporte pneumático.

Duas possibilidades de dispositivos de alimentação Venturi foram encontradas e são apresentadas na Figura 2.5 (*Mills, 2004; Marcus et al., 1990*). *Mills (2004)* e *Marcus et al. (1990)* denominaram “Venturi comercial” o dispositivo da Figura 2.5.b.

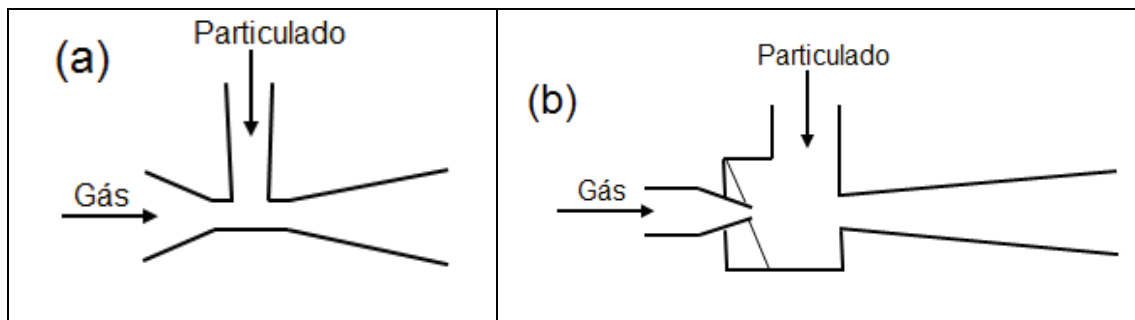


Figura 2.5 – Alimentadores com restrição tipo Venturi. A imagem apresenta os alimentadores na orientação horizontal. a – Venturi para alimentação em sistemas com baixa pressão. b – Venturi “comercial”.

Mills (2004) argumenta que a utilização do afunilamento conforme a Figura 2.5.a, apesar de mais simples, possui aplicabilidade limitada às baixas pressões (abaixo de 1bar gauge) devido à necessidade de grande estrangulamento para situações de maior pressão.

O elevado estrangulamento da garganta na Figura 2.5.a restringe a área disponível para escoamento dos sólidos no conduto de alimentação, também restringindo a vazão de sólidos. Assim, dois efeitos encontram-se presentes: o afunilamento da garganta e o afunilamento da junção; e ambos possuem efeitos opostos com relação à vazão de alimentação de sólidos.

O alimentador tipo Venturi é geralmente utilizado para materiais de escoamento livre (não coesivos) e em pequenas distâncias de transporte (*Mills, 2004*).

A Figura 2.6 traz os modelos estudados por *Lopes (2007)* em transportador vertical. Os alimentadores foram utilizados com orientação vertical e uma válvula guilhotina entre o reservatório e a entrada do tubo inclinado era usada para regular a entrada de material particulado. A configuração *tubo inclinado sem bocal (puramente gravitacional)* mostrou-se instável, enquanto as configurações com restrição abrupta e descarga de material na região de depressão de um dispositivo Venturi operaram com sólidos em diversas condições de vazão de ar.

A Figura 2.6 b e c, casos em que sólidos foram inseridos com sucesso no sistema, correspondem a alimentadores com restrição abrupta e Venturi, respectivamente (bocais).

A maior diferença do alimentador da Figura 2.6.c, encontrada em *Lopes (2007)* em relação ao alimentador da Figura 2.5 é que a recuperação da pressão à jusante da alimentação dá-se de forma abrupta se comparada ao dispositivo Venturi (comercial) proposto por *Mills (2004)* e *Marcus et al. (1990)*, o que ocasiona maiores perdas de carga, entretanto a construção do primeiro é mais simples.

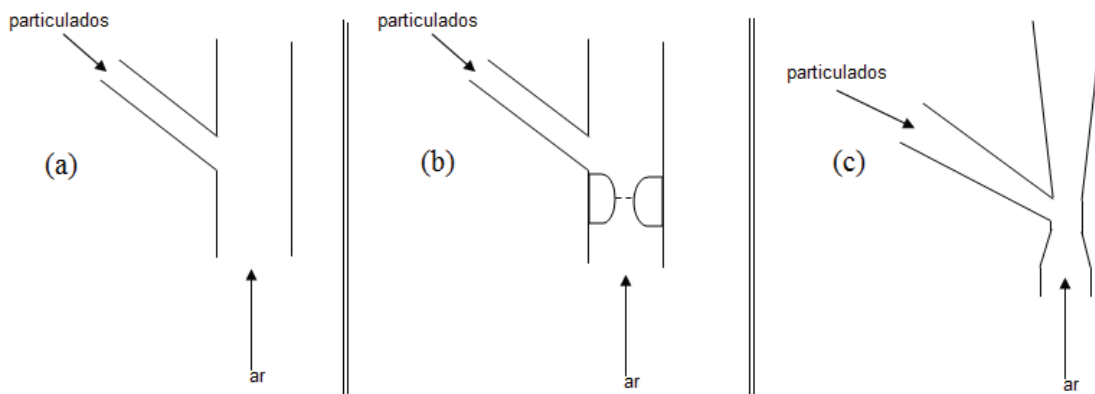


Figura 2.6 – Dispositivos de alimentação utilizados por Lopes, 2007. (a) - sem restrição. (b) - com restrição abrupta. (c) – com restrição tipo Venturi.

Sendo na horizontal, ou na vertical, a única possibilidade para o controle da vazão de sólidos é a inclusão de elementos externos ao sistema. Sistemas externos também podem minimizar efeitos da altura de sólidos no reservatório sobre a vazão de sólidos no transportador.

Denominar-se-ão estes dispositivos de externos, pois eles não provocam alterações diretas na geometria do conduto de transporte, como fazem os bocais, ou dispositivos internos. Existem diversos dispositivos externos e alguns deles serão abordados na seção 2.2.2 e 2.2.3.

A forma mais simples de controle da vazão de sólidos é a utilização de válvulas, como a válvula guilhotina. *Lopes (2007)* e *Lopes et al. (2011)* apresentam estudos em um transportador pneumático ascendente cuja vazão de sólidos foi controlada através de válvula guilhotina, apresentando bons resultados com relação a manipulação da vazão.

Quando em alimentação gravitacional, nem sempre a válvula colocada na saída do reservatório de sólidos exerce a influência necessária sobre a vazão de material particulado (*Costa, et al., 2004*). Modificações físicas (como inclinação) do conduto de alimentação são pouco úteis em termos práticos.

A inclusão de dispositivos externos mais sofisticados pode ampliar as possibilidades de controle da vazão de sólidos, assim, como a faixa de operação pode ser também aumentada.

Enquanto a alimentação puramente gravitacional é descartada para fins práticos, a alimentação gravitacional com restrição é aplicável e possui vantagens frente a outras opções, como: simplicidade (incluindo ausência de partes móveis), tamanho reduzido e baixo custo (*Mills, 2004*, e *Lopes, et. al, 2011*).

2.2.2 Dispositivos mecânicos de alimentação

Estes dispositivos operam através da ação de partes móveis sobre as partículas a serem alimentadas.

O meio mais utilizado industrialmente é o da válvula de rotação sobre o dispositivo de alimentação gravitacional, permitindo o controle da vazão de material granular apenas através da rotação da válvula (*Mills, 2004*).

Os alimentadores por válvulas de rotação possuem grande diversidade de construção (*Mills, 2004*). A Figura 2.7 mostra o desenho esquemático de uma delas.

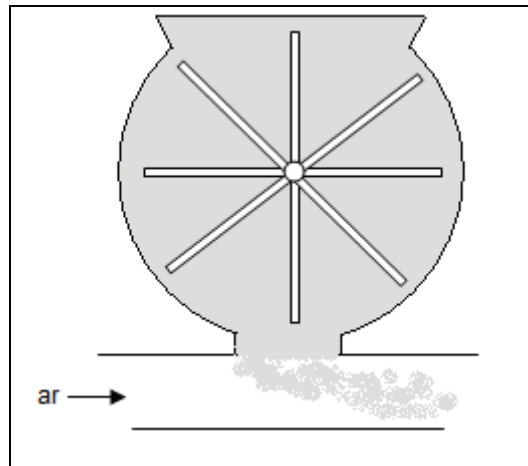


Figura 2.7 – Desenho esquemático da válvula rotativa de alimentação de sólidos.

A válvula de rotação pode ser utilizada tanto para materiais em escoamento livre, como coesivos.

Suas principais desvantagens são a presença de partes móveis e o desgaste (abrasivo e erosivo). Além disso, o problema de desvio da corrente do conduto de transporte também é marcante. Assim, a combinação de válvulas de rotação com dispositivos de restrição ao escoamento é comum (Mills, 2004), aumentando a vazão de particulado e pressão em que podem operar.

A alimentação por rosca sem fim também pode ser aplicada, com a vantagem de que a relação entre a vazão de sólidos e a velocidade de rotação ser mais bem aproximada por uma relação linear (Mills, 2004). Entretanto, elas são menos comuns em sistemas a pressão positiva, pois existem agravantes com relação ao desvio da corrente principal de escoamento, embora mudanças possam ser realizadas para ampliar sua aplicabilidade (Mills, 2004).

2.2.3 Aeração no conduto de alimentação: válvulas com aeração

Muitos trabalhos apresentam a alimentação na orientação vertical. Este tipo de alimentação é comumente encontrado em aplicações para leitos fluidizados circulantes, ou seja, trecho ascendente utilizado como operação unitária.

A alimentação diretamente na parte ascendente pode reduzir, ou mesmo eliminar o efeito gravitacional, permitindo o controle preciso da alimentação de material granular utilizando dispositivos externos, como, por exemplo: válvula-

L, válvula-J.

Estes dispositivos não são mecânicos e funcionam através da injeção de gás secundário pelo conduto lateral ou reservatório de sólidos para forçar a movimentação do material granular e assim inseri-lo na corrente de gás principal.

Kim et al. (2008) avaliaram experimentalmente tanto configurações de entrada com orientação vertical, como de saída, utilizando análise de séries temporais da pressão, buscando analisar a estabilidade das variáveis do processo (vazão mássica de sólidos), os regimes gerados no leito e a estabilidade dinâmica destes regimes com variações nas condições operacionais. A Figura 2.8 apresenta as configurações de entrada desse trabalho.

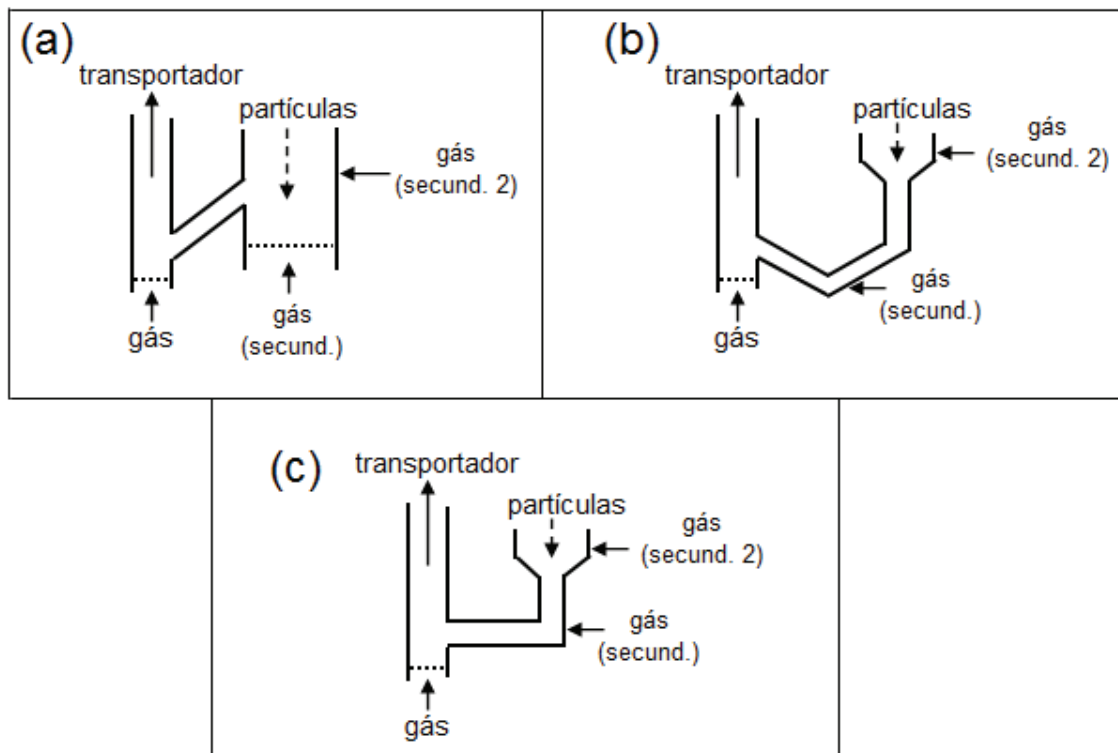


Figura 2.8 – Dispositivos de alimentação utilizados por *Kim et al. (2008)*. Adaptado de *Kim et al. (2008)*. a – 'loop' bloqueado. b – válvula J. c – válvula L.

Neste desenho esquemático é possível observar a existência de alimentação de ar secundária no reservatório e em pontos dos dispositivos externos. Estas entradas de ar impulsionam a injeção de sólidos na corrente de ar principal.

Quando válvulas com aeração são utilizadas é comum dispensar-se a

utilização de restrição (bocal) na linha de transporte, já que o conduto de alimentação opera em pressões positivas e os sólidos são colocados em movimento pela própria corrente de ar secundária.

2.2.4 Alimentador tipo jorro

O alimentador tipo jorro pode ser encontrado em vários trabalhos científicos (como em *Costa, et al., 2004*) para a alimentação de material granular em trecho ascendente.

Este tipo de alimentador não opera com a inserção de particulado pela ação gravitacional em conduto de alimentação (lateral), não utiliza partes móveis e nem a inserção de correntes secundárias em sistemas externos. Nele a alimentação de material é feita diretamente na corrente principal de transporte, através de uma câmara de mistura na entrada do transportador.

A câmara em questão possui princípios fluidodinâmicos muito similares ao de um leito de jorro (*Mathur & Epstein, 1974; Freire et al., 2009*).

O alimentador tipo jorro está esquematizado na Figura 2.9 e outras configurações podem ser encontradas com o mesmo princípio de funcionamento, como, por exemplo, em *Grbavcic (2006)*.

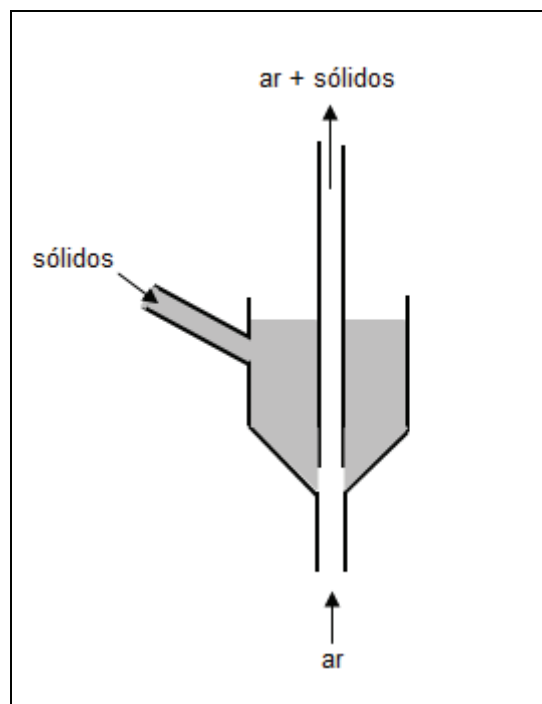


Figura 2.9 – Desenho esquemático do alimentador tipo jorro.

O jorro deve ser vedado, de modo a permitir somente a passagem de ar pelo conduto de transporte. O sistema passa assim a operar sob pressão, o que garante a expulsão da mistura gás e sólidos somente pelo conduto de transporte.

A vantagem deste sistema é a inserção de sólidos em toda região anular do jorro, o que aumenta a capacidade de vazão de sólidos do sistema (Lopes, 2011), ainda mantendo o regime diluído de operação. Além disso, ressalta-se a homogeneidade do material na região de alimentação, característica já bem conhecida do jorro e muito interessante em diversas operações da indústria, como a secagem de materiais granulares.

Por fim, o sistema não utiliza partes móveis, evitando as desvantagens de sistemas mecânicos de alimentação.

É válido destacar que para esse tipo de sistema de alimentação a vazão de material sólido está correlacionada com a vazão de ar no sistema (Costa, et al., 2004, e Lopes, 2011).

Por fim, os limites da aplicação da alimentação em jorro são similares aos das aplicações do próprio jorro, pois o canal de jorro torna-se instável na presença de materiais coesivos, por exemplo.

2.2.5 Limitações do conhecimento sobre a alimentação de sólidos

Apesar da importância dos escoamentos gás-sólido e do destaque técnico que releva os estudos da alimentação de sólidos em corrente fluída, as discussões que concernem esse elemento e a região próxima a alimentação estão longe de serem esgotadas.

Dando destaque a esta questão, You et al. (2009) e Du et al. (2004) alertaram para a falta de resultados experimentais que detalhem a zona de alimentação em CFBs.

Apesar dos recentes esforços experimentais, a dificuldade de obtenção e análise de resultados experimentais têm sido uma grande barreira para o desenvolvimento da área de escoamentos multifásicos, tanto na compreensão dos fenômenos envolvidos, como na generalização das observações experimentais e desenvolvimento de modelos matemáticos (Arastoopour,

2001).

Esta dificuldade é ainda maior para condições utilizadas nesta tese (similares às de Zhu et al, 2003; Du et al., 2004). Neste contexto, a simulação dos sistemas de interesse ganha ainda mais destaque, podendo servir para interpretação e análise de resultados (como ocorre em *You et al., 2008*) e também, de modo aplicado, visando melhorias no seu projeto e operação.

2.3 Modelagem de escoamento multifásico: formulações e contextualização

Existem *basicamente* duas formulações de modelo para tratar o material particulado em escoamento: como uma partícula (modelo fluido-partículas ou Euler-Lagrange), ou como um fluido (modelo de dois fluidos ou Euler-Euler).

Estas são as duas formulações distintas para modelos que sejam fenomenológicos, ou seja, os mais próximos do *puramente teórico*.

Apesar de muitas relações empíricas serem comuns, elas geralmente ocorrem na representação de escalas bem menores do que as que se deseja incluir de modo direto, como costuma ocorrer com a aplicação da função de parede para representação local da turbulência ou de arraste para fase particulada.

Assim, nas representações mais rigorosas, é possível obter modelos em que não existe qualquer ajuste a parâmetros concentrados e todas as considerações teóricas ocorrem explicitamente, o que confere representação física a pelo menos a grande maioria dos parâmetros.

Estas características levam a citação dos modelos com a denominação de *puramente teóricos* (como referido por *Ma et al., 2010*), ou *fenomenológicos*, por mais que certos parâmetros e relações de micro-escala sejam necessárias (para turbulência, ou comportamento granular).

O modelo de dois fluidos, ou Euler-Euler, trata o problema como um escoamento multifásico de dois fluidos, ou seja, sob a hipótese de meio contínuo (pseudo-fluido).

Em outras palavras, consideram-se as várias fases como *contínuas*

interpenetrantes, utilizando-se variáveis macroscópicas (propriedades médias da micro-escala do particulado) definidas como funções contínuas da posição espacial e do tempo e expressas em equações de balanço sob a hipótese de continuidade do meio para a descrição de ambas as fases: contínua e discreta (particulado com tensões, velocidades médias, etc).

Lun et al. (1984) apresenta a explanação em detalhes sobre a modelagem de escoamentos gás-sólido em modelos de dois fluidos e sobre a teoria cinética granular. Informações também podem ser encontradas em *Gidaspow (1994)*.

Em todos os casos a fase gasosa é tratada como contínua. Entretanto, a fase particulada pode ser tratada como contínua, ou essa hipótese pode ser substituída pela de mistura gás-sólido contínua (*Milioli, 2006*).

A abordagem contínuo-contínuo tem sido a preferida na modelagem de processos e pesquisa aplicada, pois fornece diretamente as variáveis macroscópicas de interesse para o projeto e análise de equipamentos e processos na engenharia.

Outro fator que contribui para a popularidade do modelo de dois fluidos é a conveniência computacional, pois sua implementação numérica está amplamente difundida em simuladores comerciais, que incluem formas de tratar as interações partícula-partícula.

Entretanto, não existe teoria geral aceita da teoria do contínuo em todas as condições de escoamento (*Zhu et al., 2007*). Assim, considerações globais devem ser feitas para obtenção de equações constitutivas (fechamento para interação partícula-partícula e partículas-contínuo) e condições de contorno.

A seção 3.2.2 apresenta em mais detalhes os modelos utilizados nas simulações eulerianas desenvolvidas para a presente tese, já com simplificações e particularidades do sistema em análise. Entretanto, detalhes com relação ao desenvolvimento matemático não foram apresentados. Estes detalhes estão largamente difundidos e podem ser encontrados em diversas referências (como *Gidaspow, 1994*, e *Ishii, 1975*).

No caso do tratamento dado ao material granular nos modelos partículas-fluido, ou modelo Lagrange-Euler, as equações de transporte do gás são governadas pela mecânica dos fluidos, enquanto as partículas são tratadas

como fase discreta, pela mecânica dos corpos.

Assim, um balanço de forças é realizado para cada partícula, representando a taxa de variação temporal do *momentum* (aplicação da *segunda lei de Newton*).

A hipótese de partícula pontual é muito comum na abordagem Euler-Lagrange.

Apesar da denominação Lagrange-Euler estar relacionada ao referencial que se utiliza para as partículas no modelo (referencial Lagrangeano), o que a priori engloba qualquer tipo de modelagem de partícula para a fase discreta, é comum encontrar na literatura da área a denominação Lagrange-Euler principalmente se referindo as simulações que desprezam as forças de interação partícula-partícula (*Martin & Williams, 2009; Chu & Yu, 2008*), tratando as partículas como corpúsculos sem volume (*volumeless particles Martin & Williams, 2009*).

Para o LPT, correlações são necessárias para as forças de interação partícula-fluido, uma vez que o escoamento da fase contínua em torno de cada partícula não é resolvido.

As correlações mais estudadas e conhecidas são para o arraste (*Marcus et al., 1990 e Martin & Williams, 2009*), entretanto, correlações são encontradas para forças de Magnus, Saffman, Basset e de massa adicionada (*Mass added*), como indica *Martin & Williams (2009)*. Além disso, devido à hipótese de partícula pontual, considera-se apenas o movimento de translação das partículas.

Apesar de desprezar o choque entre partículas, o LPT costuma representar o choque das partículas com superfícies sólidas, como paredes de um transportador pneumático, através de coeficientes de restituição.

A inclusão da interação partícula-partícula é geralmente realizada nos modelos fluido-partículas pela modelagem de elemento discreto (*discrete element modeling, DEM*).

Quando as dimensões da partícula (ou das partículas) são consideradas, os modelos são denominados de modelos de partícula discreta (*discrete particle models*). Pertencem a essa classe diversos modelos (*Martin & Williams, 2009*), que possuem variados propósitos. Abordaremos nesta revisão os modelos tipo DEM.

Os primeiros trabalhos a utilizarem modelagem DEM não consideravam efeito da fase contínua sobre a particulada (*Martin & Williams, 2009; Zhu et al., 2007*). O modelo DEM continua sendo utilizado para o estudo de sistemas cuja influencia do escoamento de fluido é marginal, mas recentemente o acoplamento do modelo DEM ao CFD tem ganhado destaque (*Chu & Yu, 2008*).

As descrições do modelo trazem a sigla CFD-DEM quando o modelo DEM é acoplado a solução das equações de balanço para as variáveis macroscópicas da fase contínua (Navier-Stokes). Deste modo, a simulação CFD-DEM é de partícula discreta, em que cada partícula não é tratada simplesmente como pontual e a fase fluída é tratada como contínua.

A denominação contínuo-discreto não será utilizada, evitando confusões com o termo discreto relacionado à partícula, não à fase. O termo Lagrange-Euler deverá se referir a toda a classe de modelos que trata uma das fases como discreta (incluindo tanto LPT e CFD-DEM). Deste modo, espera-se evitar confusões quanto aos jargões da área.

A formulação discreta (partícula-fluido) apresenta limitações computacionais. Assim, a sua utilização é comumente limitada pela capacidade computacional disponível, cujas restrições se acentuam em problemas com alta densidade de partículas no sistema e domínios computacionais de grandes dimensões.

Embora tradicionalmente aplicada para compreender as propriedades do escoamento em domínios computacionais restritos nas dimensões espaciais ou com baixa densidade (concentração volumétrica característica de escoamento diluído) de particulado em escoamento, alguns trabalhos as utilizaram para análise de processos ou partes de equipamentos de engenharia (*Chu e Yu, 2008; Xiong, 2005*). Entretanto, as respostas do modelo não são diretamente na escala de engenharia (macro escala), uma das razões pela qual o modelo Euler-Euler tem sido preferido em aplicações (*Zhu et al., 2007*).

Além da modelagem acerca da movimentação do material particulado também existe a dificuldade de avaliar os efeitos da turbulência nos fenômenos observados, umas vez que as vazões de ar utilizadas geralmente acarretam comportamento turbulento. Além disso, de modo geral, o maior interesse está

em simular o escoamento livre da mistura, não apenas em regiões de camada limite, que são muitas vezes laminares.

A abordagem mais viável (Wilcox, 2004) para inclusão dos efeitos de turbulência para domínios computacionais de interesse na engenharia ainda é a utilização das equações médias de Reynolds-Navier-Stokes (Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS).

A média das equações de Navier-Stokes, com a devida consideração com relação ao vetor velocidade (média mais velocidade randômica), leva a inclusão de mais seis variáveis independentes ao problema. Estas variáveis, quando interpretadas como um tensor simétrico, recebem a denominação de tensor das tensões de Reynolds.

As diferentes abordagens para o tratamento do tensor das tensões de Reynolds trazem novas equações para o sistema de equações características do escoamento.

A hipótese conhecida como *aproximação de Boussinesq da viscosidade de vórtices (eddy-viscosity approximation)*, advinda de uma analogia com o movimento molecular randômico, é a alternativa que gera modelos mais simples (menos equações diferenciais) para tratamento do tensor das tensões de Reynolds (Wilcox, 2004).

A aproximação de Boussinesq da viscosidade turbulenta traz uma definição similar à de Newton para a viscosidade (fluidos Newtonianos), mas define por analogia a viscosidade de vórtices (*eddy-viscosity*), que precisa ser estimada para cálculo do tensor das tensões de Reynolds.

Neste âmbito, os modelos de duas equações tem se destacado nas últimas décadas por sua simplicidade e ao mesmo tempo capacidade de representar com relativa exatidão uma grande variedade de problemas (Wilcox, 2004). Os modelos mais importantes neste contexto são o $k-\omega$ e $k-\epsilon$, além de variantes dos mesmos.

Em anos recentes o modelo $k-\epsilon$ tem se popularizado nas aplicações em engenharia, mas não existe modelo de excelência para representação da turbulência e a área ainda é fonte de muita investigação. Na realidade o próprio modelo $k-\omega$ tem se mostrado mais eficiente que o $k-\epsilon$ em diversas situações (Wilcox, 2004).

2.4 Região de alimentação e desenvolvimento do escoamento: conhecimento experimental e CFD.

Em contrapartida à quantidade limitada de estudos focando a secagem, muito conhecimento tem sido gerado sobre as distribuições axial e radial de concentração de particulado fino para diversos regimes de fluidização em operações convencionais do CFB nas recentes décadas.

Du et al. (2004) obtiveram medidas de ECT (electrical capacitance tomography) e analisaram a estrutura do escoamento tanto na região desenvolvida como na zona de entrada do transportador, em regime diluído e denso para particulado fino.

Du et al. (2004) encontraram estruturas radiais de distribuição de fase sólida em trecho ascendente de um CFB para partículas de FCC operando tanto em regime denso como diluído e em diversas condições operacionais que se diferenciavam das comumente propostas na literatura: uniforme para diluído e centro-anular para fluidização rápida (regime denso).

Sendo um trabalho recente, observamos que mesmo no caso do particulado fino estamos longe de obter consenso e generalização com relação ao comportamento do escoamento em trecho ascendente.

Du et al. (2004) também sugerem que o método de alimentação tem somente pequena influência na estrutura de escoamento de todo o trecho ascendente.

Neste ponto é importante frisar que existe somente conhecimento limitado com relação à alimentação de sólidos e sua influencia no resto do escoamento apesar de sua importância. Esta limitação estende-se até mesmo quando particulado fino é utilizado (*Wilde et al, 2005; You et al., 2009*).

You et al. (2009) utilizaram simulações do escoamento em trecho ascendente para analisar diferentes alimentadores. As simulações foram desenvolvidas com modelo Euler-Euler, modelo k- ϵ para turbulência e sob a hipótese de simetria axial. Apesar da simplicidade do modelo, os autores realizaram satisfatoriamente comparações com resultados experimentais de *Du et al. (2004)*.

Neste contexto, ressalta-se que a faixa restrita de verificação experimental encontrada em *Du et al. (2004)* e na literatura em geral, tornam os bons resultados das simulações apresentadas no trabalho de *You et al. (2009)* difíceis de serem generalizados.

Wilde et al. (2005) estudaram os efeitos da alimentação em CFB por simulações e experimentação em escala piloto operando em regime diluído com partículas do tipo A de Geldart. O trabalho destacou que a região de desvio (*bypass*), em que o ar não se mistura aos sólidos próximo à alimentação, pode alternar-se entre o lado do conduto de alimentação e o lado oposto dependendo da vazão de sólidos no sistema.

Wilde et al. (2005) também destacaram que os efeitos da alimentação tendem a dissipar-se rapidamente depois da alimentação no sistema em diâmetros relativamente pequenos de tubulação. Estes resultados foram condizentes com os experimentos apresentados por *Cheng et al. (1998)*.

Entretanto, *Wilde et al. (2005)* destacaram que a mistura radial apresentada em suas simulações para trechos ascendentes de diâmetros maiores era pobre, o que fez com que a alimentação influísse em todo trecho vertical simulado (14 metros).

Infelizmente, a generalização do conhecimento acerca do escoamento gás-sólido nas condições para aplicações tradicionais do leito fluidizado circulante em situações da secagem e pré-aquecimento de materiais não é possível devido à complexidade teórica dos fenômenos físicos envolvidos.

As restrições com relação à secagem tornam-se mais evidentes quando material grosseiro está sendo utilizado. Nestes casos, efeitos inerciais tornam-se mais relevantes e os sólidos tendem a não mais serem severamente afetados pelo campo de velocidades da fase contínua.

Os estudos para material grosseiro geralmente focam aplicações somente de transporte pneumático de material granular. Nestes casos a alimentação comumente é realizada na orientação horizontal.

Muito do que se conhece sobre a distribuição de material granular no transporte diluído horizontal está sintetizado em *Fokeer et al. (2004)*.

A utilização de curvas para entrada da mistura gás-sólido em trecho ascendente já foi largamente estudada devido ao enfoque no transporte

granular.

Zhu et al. (2003) utilizaram dados de ECT para analisar o comportamento do material granular em trecho ascendente depois de uma curva em diversos regimes de escoamento.

Apesar de não conseguir quantificar a distribuição do particulado em observações transientes do escoamento disperso, *Zhu et al. (2003)* concluíram que a concentração de sólidos era maior quando próximo a parede, tanto a distância 0,47 como 2,05 metros do trecho horizontal.

Através da média temporal das medidas experimentais resultados de *Zhu et al. (2003)* indicaram a estrutura centro (diluído)-anular(concentrado) para diferentes comprimentos na vertical, até 2,66m de trecho ascendente.

Estruturas de escoamento tipo corda (*“rope formation”*) não foram observados por *Zhu et al. (2003)*, diferentemente do reportado por *Huber & Sommerfeld (1994)* e *Yilmaz & Levy (2001)*, para particulado fino.

Huber & Sommerfeld (1994) destacaram que partículas pequenas eram fortemente afetadas por efeitos de turbulência e pela interação com o escoamento médio, enquanto partículas maiores tinham seu movimento ditado por efeitos de inércia.

Vashisth & Grace (2012) estudaram efeitos da curva na entrada de um trecho ascendente e encontraram comportamento fluidodinâmico muito distinto para simulações de partículas tipo A, B e D de Geldart.

Apesar dos estudos em curvas, não foram encontradas simulações para a alimentação de particulado grosseiro na orientação vertical.

2.5 Sumário e observações finais

Mesmo que a operação de leitos fluidizados circulantes com particulado fino já tenha sido largamente estudada devido à sua enorme importância econômica, essa configuração ainda é razão de discussão.

Muitos trabalhos recentes têm estudado, por exemplo, a estrutura do escoamento gás-sólido e o impacto das configurações de entrada e saída de sólidos na fluidodinâmica do trecho ascendente em aplicações convencionais do CFB.

A partir destes trabalhos conclui-se que a alimentação possui somente

importância marginal no escoamento de material particulado fino (de 60 a 80 μ m de diâmetro) em trecho ascendente quando em diâmetros de tubulação relativamente pequenos (em torno de 10 cm).

Aplicações de secagem ou pré-aquecimento de sólidos tornam o escoamento gás-sólido diluído de material particulado grosseiro relevante. No entanto, ao contrário dos estudos em CFB, a maioria dos trabalhos foca somente o transporte pneumático de material granular em escoamento livre.

Neste contexto, existem diversos dispositivos para alimentação de material particulado em transportadores pneumáticos sob pressões positivas. Além disso, essa seção do transportador possui importância tanto para viabilidade técnica como econômica dos transportadores. Apesar de sua importância, as discussões com relação a estes dispositivos e sua influência no transportador estão longe de serem esgotadas.

Vale destacar que os estudos realizados para aplicações de transporte de material particulado grosseiro comumente não utilizam configurações mais apropriadas à secagem e pré-aquecimento de material granular, como, por exemplo, a alimentação diretamente no trecho ascendente.

O conhecimento gerado em aplicações convencionais dos CFBs não pode ser generalizado devido à complexidade dos fenômenos envolvidos. Portanto, o comportamento do material granular quando em transporte vertical com alimentação de mesma orientação permanece inexplorado.

A presente tese teve por objetivo contribuir para o conhecimento sobre o comportamento do material sólido em transportador quando alimentado com dispositivo Venturi para baixa pressão em orientação vertical. O principal enfoque foi em relação às distribuições radial e axial de sólidos.

Este dispositivo foi escolhido pelas vantagens que oferece conforme mencionado anteriormente (*Lopes, et al., 2011; Lopes, 2011*).

3 Materiais e métodos.

3.1 Ensaios experimentais.

3.1.1 Aparato experimental.

Os dados experimentais foram obtidos no transportador pneumático circulante (realimentado ou “loop” para transporte pneumático) presente no centro de secagem do departamento de engenharia química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A Figura 3.1 mostra o equipamento utilizado.

Um soprador de 7,5HP (ERBELE, São Paulo, Brasil) com capacidade de 380m³/h era utilizado para suprimento de ar no sistema pelo conduto horizontal da Figura 3.1.

Duas válvulas globo foram utilizadas para manipulação da vazão de ar no sistema: uma restringindo a passagem de ar diretamente na tubulação horizontal de alimentação para o trecho ascendente e outra de desvio (*bypass*).

O conduto de alimentação de sólidos recebe as partículas a partir de um reservatório de base cônica. A parede do tronco de cone que constitui a base do reservatório forma um ângulo de 60° com a horizontal. A capacidade do reservatório é de aproximada 50Kg de sólidos (esferas de vidro com diâmetro de 1mm).

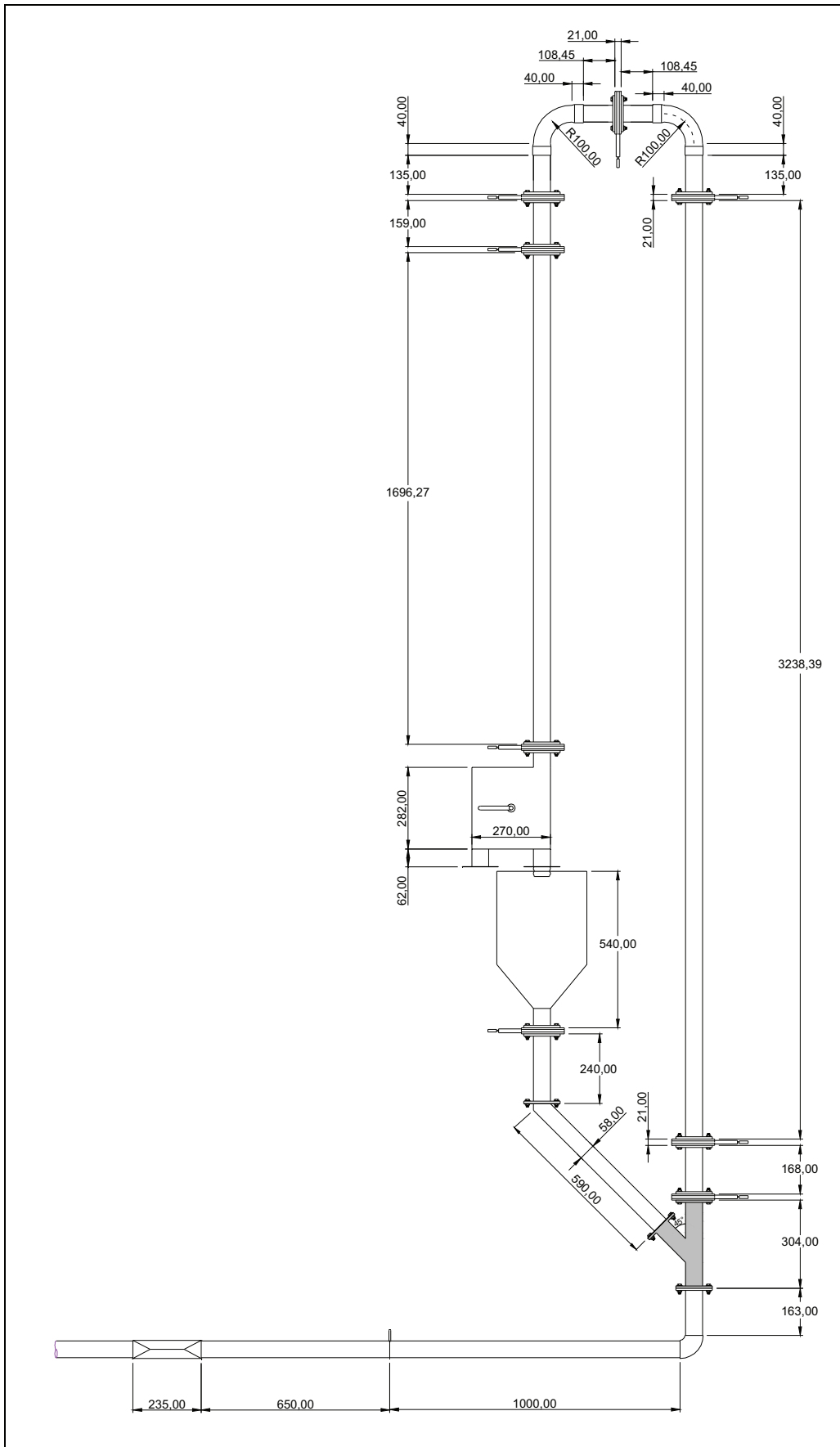


Figura 3.1 – Desenho técnico do leito pneumático circulante (“loop” ou leito fluidizado circulante). Cotas em mm.

Uma válvula guilhotina (Figura 3.2) na saída do reservatório servia a manipulação da vazão de sólidos. O ajuste da válvula de liberação de sólidos era feita manualmente.

A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático das válvulas guilhotinas presentes no transportador.

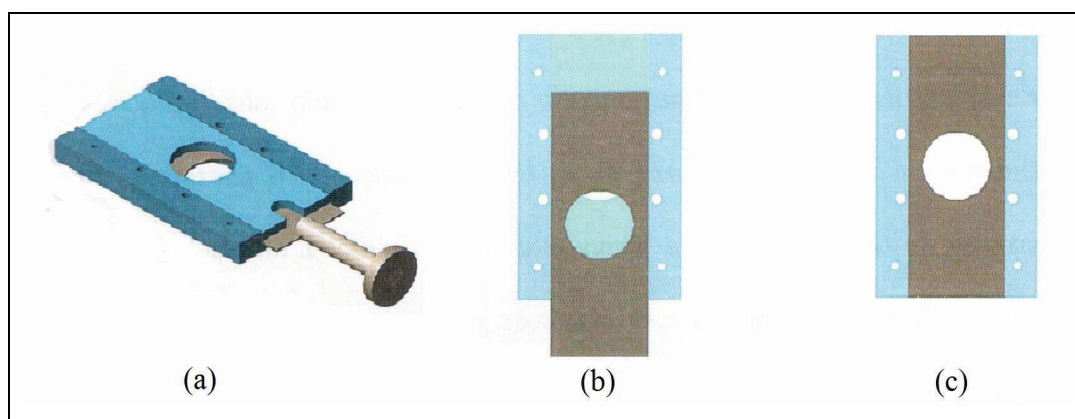


Figura 3.2 - Válvula guilhotina para manipulação da vazão de sólidos. Reproduzida de *Lopes (2011)*. a – válvula em perspectiva. b – válvula com abertura parcial. c – válvula totalmente aberta.

Demais válvulas guilhotinas presentes no transportador (Figura 3.1) eram acionadas pneumaticamente para mensuração da porosidade média em diferentes trechos do transportador. No entanto, elas não foram utilizadas neste trabalho. Mais informações sobre sua aplicabilidade podem ser encontradas em *Patrocínio (2006)*.

Uma caixa de amostragem de sólidos estava localizada antes do reservatório (final do trecho descendente, Figura 3.1). A amostragem da vazão de sólidos era realizada pelo desvio das partículas da corrente da mistura gás-sólido ao mover uma alavanca da caixa de amostragem de sólidos. Este é o mesmo sistema que foi utilizado por *Lopes (2007)* e *Lopes et al. (2011)*.

Os sólidos eram desviados procurando-se causar o menor impacto possível na operação do sistema, eram posteriormente pesados e a vazão obtida ao conhecer-se o tempo total de recolhimento das partículas.

Um desenho esquemático da caixa de amostragem pode ser visto na Figura 3.3. Maiores informações sobre a amostragem podem ser obtidas em *Costa et al. (2004)* e *Patrocínio (2006)*.

Um dispositivo Venturi previamente calibrado e presente na tubulação

horizontal de alimentação do ar (Figura 3.1) era utilizado para mensuração da vazão volumétrica de ar.

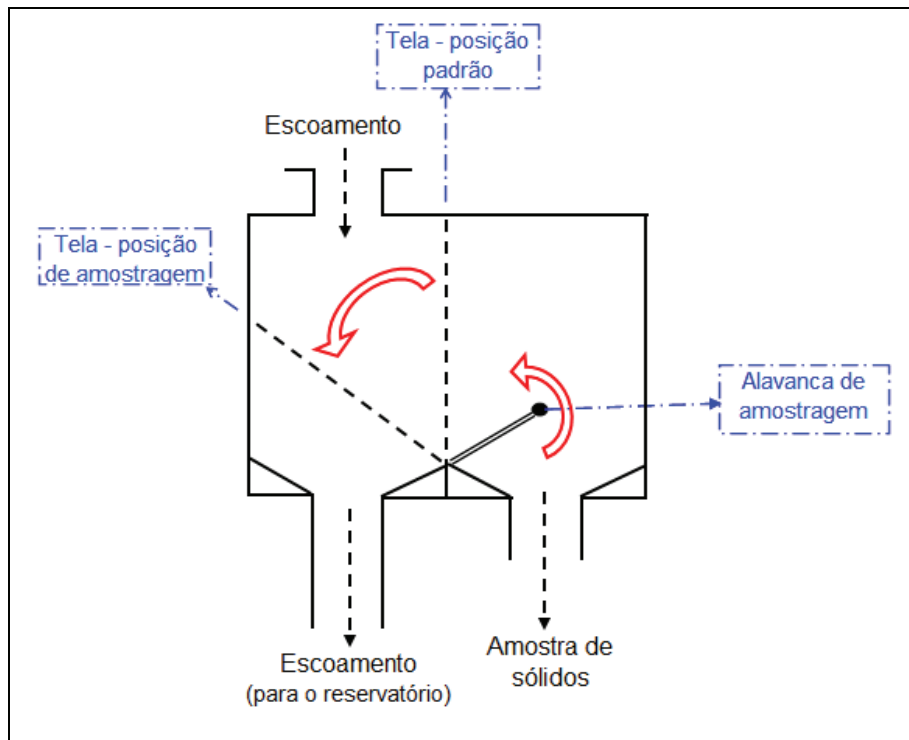


Figura 3.3 - Caixa de amostragem de sólidos presente no final do transportador.

A peça em destaque (peça cinza) na Figura 3.1 corresponde ao alimentador Venturi utilizado (orientação vertical). A Figura 3.4 apresenta detalhes do alimentador.

Este alimentador foi projetado para operar em sistemas à baixa pressão positiva. Isto devido à grande restrição ocasionada à área de injeção de sólidos para redução da pressão na garganta em sistemas com pressões elevadas. Vale ressaltar que sistemas à baixa pressão são aqueles que não superam 1 bar gauge, como definido por *Mills (2004)*.

Entre a entrada do ar no alimentador Venturi e a conexão no transportador havia uma malha para retenção de sólidos que eventualmente poderiam mover-se na direção contrária à desejada.

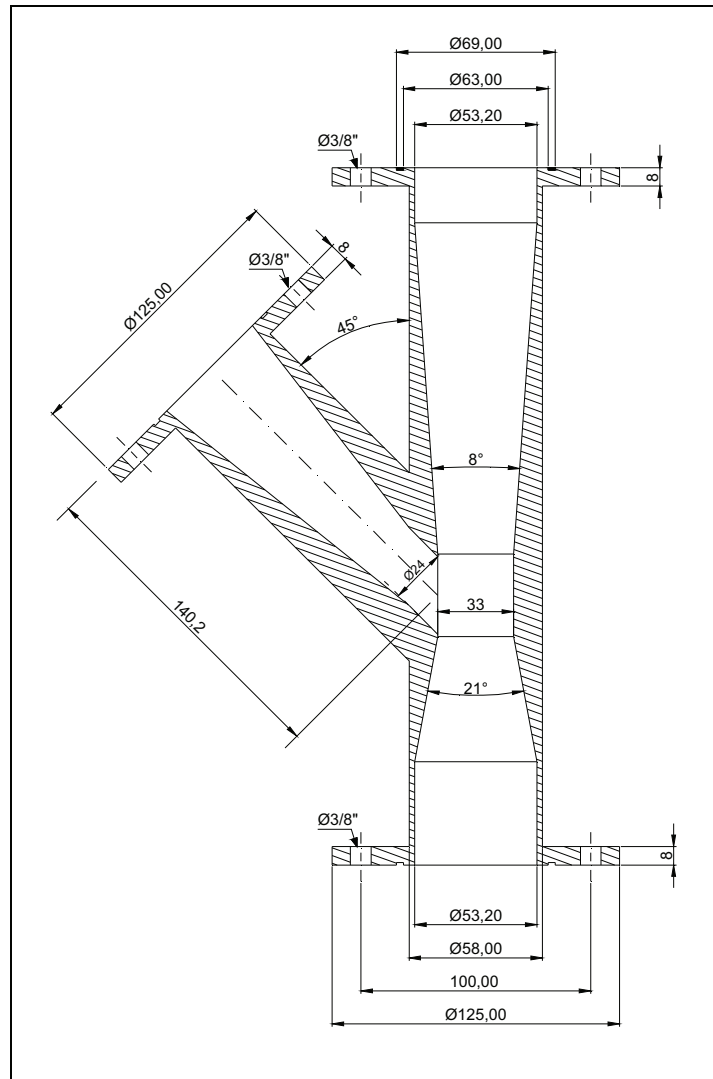


Figura 3.4 – Desenho técnico do alimentador de sólidos utilizado. Tipo de alimentador: Venturi para baixas pressões. Peça construída em aço carbono. Cotas em mm.

As “tomadas de pressão” no transportador correspondem às furações para mensuração da pressão por transdutores ou manômetros de vidro (tubo em U).

O alimentador Venturi possuía duas tomadas de pressão, que estavam na direção oposta ao conduto de alimentação. No entanto, as tomadas de pressão não estavam perfeitamente alinhadas com a direção do conduto, pois eram deslocadas em ângulo de 25° da secção apresentada na Figura 3.4. Assim, quando a peça era observada na direção do escoamento do ar, mantendo o conduto de alimentação na direção superior (zero horas) o deslocamento (25°) ocorria no sentido anti-horário do alinhamento perfeito com o conduto de alimentação nesse plano de observação. Estas tomadas de pressão foram

denominadas t1 e t2.

A tomada t1 estava à 21mm da entrada da peça de alimentação (Figura 3.4), enquanto o de t2 a 21mm da saída (ambos alinhados entre si e com espaçamento de 262mm), totalizando 304 mm para o comprimento total do alimentador.

A Figura 3.5 mostra esquematicamente as tomadas de pressão mais próximas da alimentação.

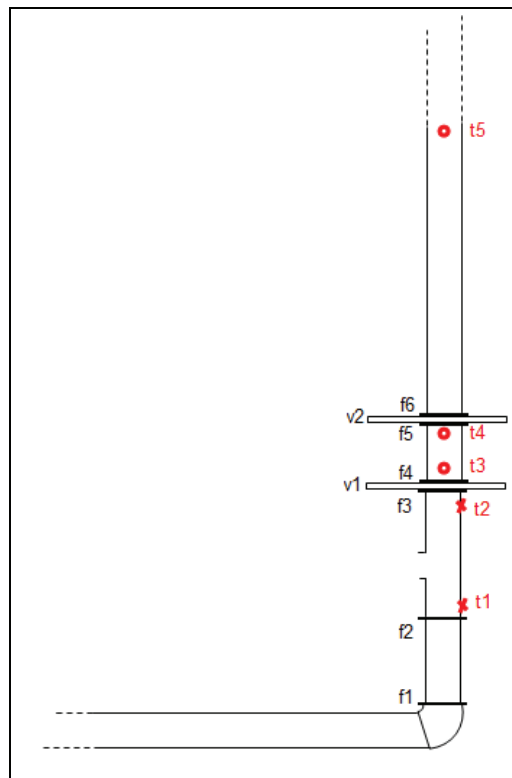


Figura 3.5 – Início do transportador pneumático. ti representa as tomadas de pressão, fj as flanges para montagem do sistema e vk válvulas guilhotina para medida da porosidade do leito.

Ressalta-se que somente t1 e t2 se encontravam do lado oposto à alimentação (com a rotação angular no plano da Figura 3.4 já mencionada). As demais tomadas de pressão se encontravam com a mesma orientação indicada na Figura 3.5 para t5 e todas elas estavam localizadas no trecho ascendente.

As pressões ao longo do leito foram obtidas utilizando-se transdutores de pressão conectados às tomadas de pressão (ti). Assim, os transdutores cobriam várias posições ao longo da parede do equipamento.

A Tabela 3.1 apresenta a notação numérica utilizada para denominação

das tomadas de pressão para amostragem e o correspondente deslocamento em relação ao t1.

O comprimento L será denominado de comprimento na direção do escoamento ou também de comprimento na direção principal.

As tomadas de pressão onde transdutores eram utilizados variavam de um ensaio para outro, exceto pelas tomadas: 1 a 4; 7 a 9. A Tabela 3.1 mostra também os modelos dos transdutores utilizados em cada tomada de pressão.

Tabela 3.1 – Posições de medida da pressão e comprimento percorrido na direção do escoamento (L) relacionado a cada posição das tomadas de pressão. O comprimento foi calculado ao considerar o t1 como referência (marco zero).

ti	Comprimento (L)		Transdutores usados	Número no leito**
	cm	M		
1*	0	0	600 series, 0-5psi	2
2	26.20	0.2620	600 series, 0-1psi	3
3	34.20	0.3420	600 series, 0-1psi	4
4	44.20	0.4420	600 series, 0-1psi	6
5	108.0	1.080	860 series, 0-1psi	7
6	158.0	1.580	860 series, 0-1psi	8
7	258.0	2.580	860 series, 0-1psi	10
8	288.0	2.880	860 series, 0-1psi	11
9	318.0	3.180	860 series, 0-1psi	12
10	343.0	3.430	860 series, 0-1psi	13

* t1 de referência para os comprimentos

** numeração escrita no equipamento para referência em trabalhos anteriores do grupo.

Somente medidas de perda de pressão no trecho ascendente foram realizadas para os propósitos da presente tese. Deste modo, vale destacar que a perda de pressão da caixa de amostragem não foi obtida. Ela, no entanto, é responsável por grande parte da queda de pressão no sistema. Informações sobre a perda de pressão nesta parte do equipamento podem ser obtidas em *Patrocínio (2006)*.

3.1.2 Instrumentação.

O módulo de aquisição de sinais analógicos NI9205 (32-Channel +/-10 V, 250 kS/s, 16-Bit Analog Input) acoplado à um sistema de aquisição cDAQ (cDAQ - 9172) foi utilizado para a aquisição de dados. A aquisição foi realizada com programas desenvolvidos pelo próprio doutorando em LabVIEW 7.1 express® (*National Instruments*®), de modo a atender prontamente as

necessidades da aplicação.

Todo o programa de aquisição de dados foi gerado por linguagem gráfica (linguagem G) em LabVIEW 7.1 express (*National Instruments*) durante o doutorado. O Apêndice A apresenta o manual de operação do programa de aquisição de dados gerado.

O programa de aquisição foi desenvolvido para permitir que o usuário adicionasse transdutores no programa apenas configurando-os em uma tela, sem necessidade de alterações no código. Isto torna o programa escalonável em termos do número de transdutores em operação.

Transdutores da série 600 e 860 fabricados pela empresa AutoTran foram utilizados na instrumentação. Todos os transdutores foram aferidos com manômetros de mercúrio.

A série 600 e 860 da AutoTran são de transdutores multipropósito para diversas faixas operacionais. A Tabela 3.1 apresenta a faixa e o modelo exato do transdutor utilizado em cada tomada de pressão, assim como a informação com relação ao sinal de saída.

Sinais de corrente entre 4 a 20mA foram transformados em voltagem de 1 a 5 Volts para aquisição na DAQ utilizada. Para tanto resistores de 250 Ω com precisão ôhmica e térmica foram adicionados entre os terminais do sinal e a referência. Ou seja, a resistência dos resistores utilizados era pouco afetada pela temperatura.

Durante a etapa de verificação da instrumentação, os transdutores foram conectados aos manômetros que já eram utilizados para medidas de pressão na tubulação. Deste modo, foi possível obter dados tanto dos manômetros como dos transdutores.

Verificou-se que as médias das séries de pressão obtidas a partir dos transdutores não apresentavam desvios significativos em relação aos dados dos manômetros. Depois desta etapa somente os transdutores eram conectados às tomadas de pressão desejadas e os manômetros utilizados para mensuração dos demais.

Os dados de verificação da aquisição não foram utilizados nas análises experimentais da seção 4.1, tendo tido somente a finalidade de garantir conformidade entre os resultados da instrumentação e os resultados de

trabalhos anteriores (*Patrocínio, 2006, Lopes, 2007, Lopes 2011*).

As medidas utilizando a instrumentação foram realizadas com diferentes frequências na aquisição do sinal de tensão dos transdutores ao longo dos ensaios realizados: 1000Hz, 1800Hz, 2000Hz e 5000Hz durante cinco segundos de amostragem simultânea dos sinais. Alguns ensaios ainda realizaram a aquisição durante dez segundos. O objetivo foi o de avaliar se estas alterações influenciavam nas medidas.

Estas mudanças não influenciaram nos valores médios e de desvio padrão das séries de pressão obtidas. Assim, somente 1000Hz durante cinco segundos eram suficientes para os propósitos de análise deste trabalho.

Todos os sinais de transdutores eram amostrados com a mesma frequência. Além de ser desnecessário alterar a frequência de um sinal para o outro, o cDAQ – 9172 (chassi c-DAQ *legacy*) não permitia a aquisição de diversos canais de um mesmo módulo em diferentes frequências de aquisição.

3.1.3 Ensaios experimentais: procedimento.

Esferas de vidro de diâmetro médio de 1,0mm foram utilizadas no ensaio com material particulado.

O procedimento experimental era dividido em duas fases denominadas 1 (leito em estabilização) e 2 (leito estável).

O objetivo da etapa de estabilização era garantir que ao menos as médias das séries temporais de pressão obtidas com os transdutores (e sistema de aquisição) não variassem com o passar do tempo.

Assim, as medidas poderiam ser realizadas considerando-se que as variáveis relevantes medidas fossem características das condições de operação utilizadas (vazão de ar, carga no reservatório de partículas, abertura da válvula de liberação de sólidos).

Vale ressaltar que ao definir a operação do leito como “estável” propositalmente evitou-se a utilização do termo “regime permanente” ou “estacionário”. Este cuidado foi tomado porque a definição de regime permanente seria muito mais restritiva e se quer pode-se afirmar que existe para o leito circulante algum regime permanente no sentido estrito da palavra (definido na teoria do contínuo em termos dos campos sob a ótica Euleriana).

Conseguimos justificar a ausência de regime permanente no sentido rigoroso a ele atribuído já ao observar que a fase gasosa escoava em regime turbulento, naturalmente transiente e tridimensional.

Deste modo estamos apenas restritos às variáveis experimentais acessíveis e aos limites de precisão de medida disponíveis. A estabilização, portanto, está livre de mais hipóteses, análise de estabilidade ou detalhes teóricos sobre o regime permanente, ou sua aproximação estatística (por médias).

A verificação da estabilidade do sistema era realizada por medidas de temperatura do ar de alimentação e do perfil de pressões.

A temperatura era obtida a partir da leitura de um termômetro no trecho horizontal de alimentação do ar no sistema, localizado depois do medidor de vazão da Figura 3.1.

O perfil de pressões era acompanhado com o programa de aquisição (medições dos transdutores) no modo transiente, sem armazenamento dos dados.

Trabalhos anteriores esperavam a estabilização inicial do sistema por até duas horas (Lopes, 2007). Entretanto, notou-se que a estabilização ocorria, em geral, muito antes disso e em menos de uma hora. Por preciosismo, uma hora de espera foi adotada como o mínimo para continuidade do ensaio.

Durante a operação estável para condições pré-estabelecidas, eram realizadas as medidas de pressão ao longo do leito. Estas medidas foram realizadas por um programa de aquisição de dados (seção 3.1.2).

Ao menos duas amostragens de todos os transdutores eram realizadas com a aquisição (checagem dos valores obtidos), o que representava a aquisição de pelo menos duas séries temporais de pressão diferentes para cada tomada de pressão.

Além disso, para ensaios com material particulado, realizava-se de três a cinco medidas da vazão de sólidos por recolhimento na saída do leito e pesagem (utilizando o desvio dos sólidos apresentado na Figura 3.3).

A constante retirada de material particulado para pesagem poderia ocasionar alteração na massa de sólidos no reservatório. Assim, a alteração da altura do leito formado pelos sólidos no reservatório poderia influenciar os ensaios.

Os sólidos eram realimentados no sistema através da própria caixa de amostragem, que possuía contato com o meio exterior. O conduto que fazia esse contato possuía abertura cônica para facilitar o despejo do material e não foi apresentado na Figura 3.2.

Depois das medidas, as condições de operação desejadas eram alteradas. No caso deste trabalho, somente a vazão de ar foi alterada, mantendo a abertura da válvula guilhotina de liberação de sólidos constante. Devido ao dispositivo de alimentação utilizado, a vazão de sólidos estava automaticamente determinada somente pela vazão de ar e abertura da válvula (discussões na seção 4.1.3).

Com as alterações nas condições de operação era necessário esperar até que o leito estabilizar-se novamente. Após estabilização, eram realizadas as medidas nas novas condições.

Trabalhos anteriores esperavam até trinta minutos (*Lopes, 2007*) pela estabilização do sistema depois de alterações nas variáveis experimentais. Entretanto, notou-se que a estabilização ocorria, em geral, muito antes disso e em menos de vinte minutos. Por preciosismo, trinta minutos de espera foi adotado como o tempo mínimo para continuidade do ensaio.

3.1.4 Tratamento e análise de dados experimentais.

As análises dos resultados experimentais foram desenvolvidas em Excel (*Microsoft Office*[®]) e matlab (*MathWorks*[®]).

Dada uma condição de vazão de ar, os resultados de pressão para cada t_i eram fornecidos como séries temporais de pressão pela aquisição de dados. A média da série de pressões para cada t_i era obtida e considerada como uma realização experimental da pressão em t_i para a vazão de ar utilizada.

Diversas réplicas experimentais foram obtidas e a cada uma delas os valores médios das séries temporais de pressão a cada t_i eram subtraídos do valor em t_1 para fornecer a realização experimental para perda de pressão em referência ao t_1 (Tabela 3.1) para vazão de ar utilizada.

Deste modo, a média e desvio padrão estimados para a perda e pressão

puderam ser obtidos a partir de réplicas de ensaios experimentais em cada condição de vazão de ar.

Neste caso, a variância experimental estimada levava em conta somente as incertezas associadas às réplicas de ensaio. No caso do presente trabalho é provável que a maior fonte de erros experimentais entre ensaios fosse o ajuste das válvulas para fixar a vazão do ar.

Vale ressaltar que ao obter a média das séries de pressão a partir da aquisição espera-se que o ruído associado à instrumentação também tenha sido filtrado a cada ensaio.

Espera-se que a dependência da pressão com o comprimento do trecho ascendente seja linear a partir de certo comprimento depois da alimentação, mesmo no escoamento bifásico em estudo (*Lopes et al., 2011*).

Valores do coeficiente de explicação para a correlação linear entre a perda de pressão em referência a t_1 e o comprimento L do trecho ascendente puderam ser obtidos entre diferentes tomadas de pressão. A análise destes coeficientes indicou entre quais t_i seria possível obter a perda de pressão por comprimento na região linear.

Assim, a perda de pressão por comprimento nesta região pôde ser obtida a partir da estimação do coeficiente angular da reta que ajustava a perda de pressão em referência a t_1 em função do comprimento de cada t_i no trecho vertical (L) para todos os ensaios. O erro padrão estimado para esse parâmetro foi considerado como sendo a estimativa do erro padrão da perda de pressão por comprimento na região e com grau de liberdade igual ao número de pontos usados na estimação subtraídos dois graus de liberdade.

Utilizou-se para referências de estatística básica *Himmelblau (1970)* e *Rodrigues & Lemma (2005)*.

3.2 Ensaios computacionais

3.2.1 Geometria e malha computacional.

A Figura 3.6 mostra um desenho esquemático para o corte do sistema em estudo no plano yz .

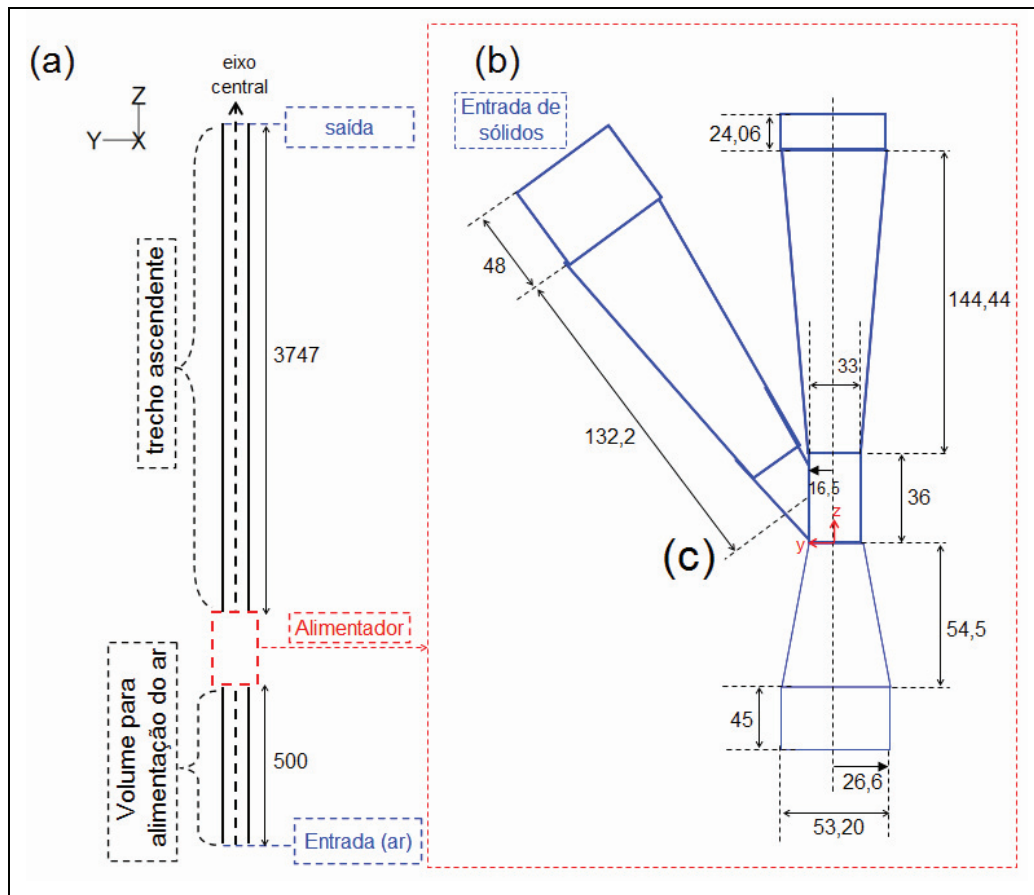


Figura 3.6 – Desenho esquemático mostrando o corte do plano yz no sistema em estudo. a – corte do trecho vertical. b – corte da dispositivo de alimentação (Figura 3.4). Cotas em mm.

O alimentador está apresentado na Figura 3.6.b (mesma geometria da Figura 3.4) e mostra o conduto lateral de alimentação unindo-se ao de transporte pela garganta de um alimentador Venturi. Denominou-se o volume dado pela união da garganta com o início do conduto lateral de volume (ou região) de junção dos condutos.

O comprimento do trecho ascendente da Figura 3.6 corresponde ao mesmo comprimento do trecho reto do aparato experimental (Figura 3.1), incluindo o trecho reto da luva da curva que segue o fechamento (realimentação) do transportador ao unir-se ao trecho horizontal superior.

A componente da velocidade na direção da alimentação (direção z na Figura 3.6 e de maior componente) será denominada componente principal da velocidade ou velocidade axial (devido à simetria axial), enquanto a outra componente será a secundária (direção y na Figura 3.6) ou radial (devido à

simetria axial).

As direções z e y da Figura 3.6 também serão denominadas principal (ou direção axial nas simulações com simetria axial) e secundária (direção radial no caso com simetria), respectivamente.

Simulações bidimensionais

A alimentação era realizada diretamente no que seria a parede da garganta no alimentador quando a simulação possuía simetria axial, sendo o eixo de simetria o eixo apresentado na Figura 3.6.

Deste modo, as simulações bidimensionais necessariamente assumiam a hipótese de que a alimentação ocorria em todo contorno da garganta, como indica a Figura 3.7.

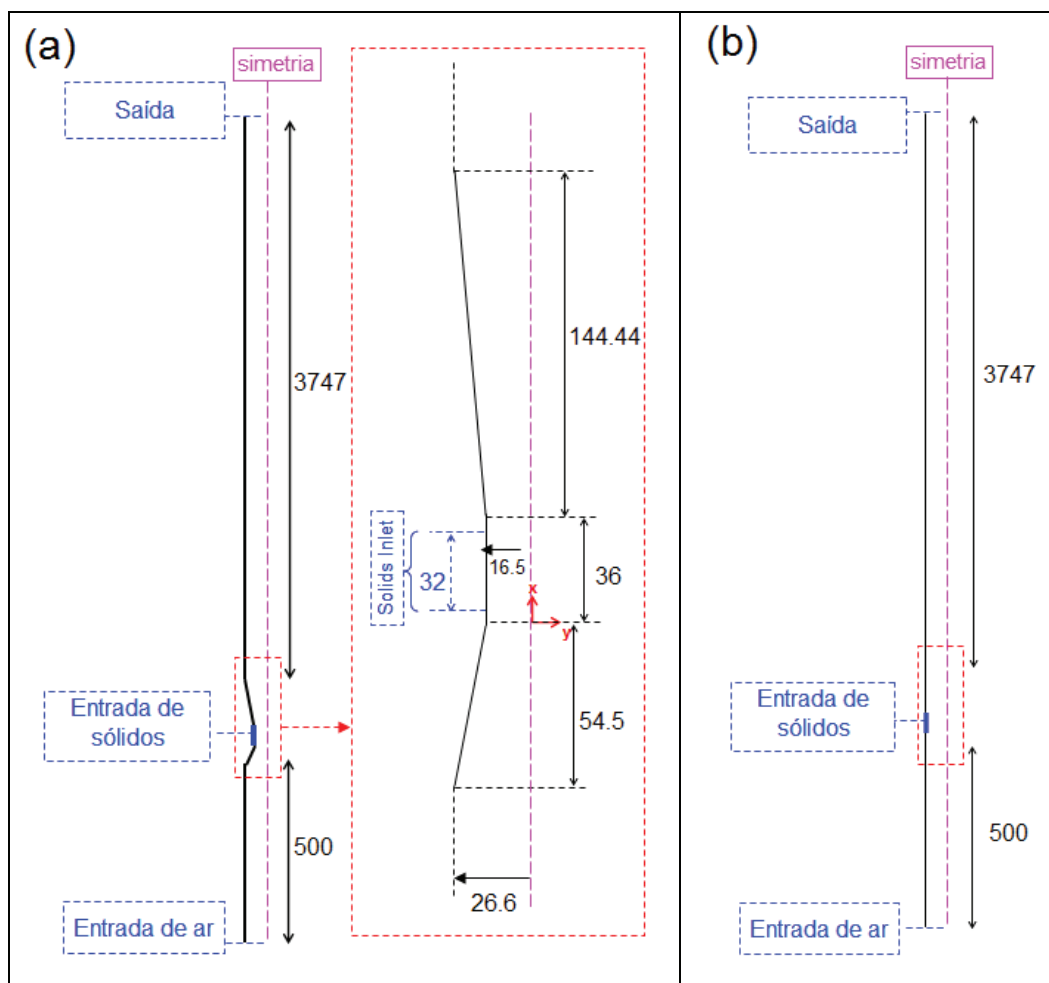


Figura 3.7 – Desenho esquemático mostrando o domínio computacional das simulações bidimensionais. a – transportador com dispositivo Venturi, dando destaque ao dispositivo para indicação da área de alimentação. b – transportador sem restrição. Cotas em mm.

Também foram realizadas simulações bidimensionais para a ausência do alimentador Venturi (caso sem afunilamento) na mesma vazão de sólidos. Assim, os sólidos eram inseridos no conduto de transporte diretamente no que seria a parede do conduto de transporte, sem a existência de afunilamento, como indica a Figura 3.7.

Casos bidimensionais utilizaram malha regular para todo o domínio computacional. Foram utilizados diferentes espaçamentos entre nós para a malha na região de junção dos condutos.

No caso da malha em sistema com dispositivo Venturi, a expansão volumétrica nos troncos de cones do dispositivo garante que o espaçamento dos nós na direção secundária e principal sejam mínimos na região de junção dos condutos. Assim, garantia-se que a aresta menor no sistema possuísse comprimento da ordem de grandeza do diâmetro característico da partícula.

Os elementos de área foram alongados na direção principal com o objetivo de reduzir o número de células necessárias e assim reduzir o tempo computacional das simulações. Assim, todos os elementos de área do domínio computacional possuíam as arestas na direção secundária como tendo comprimento igual ou maior que a principal.

A Figura 3.8 mostra a malha próxima à junção (a) e saída do *trecho vertical* (b) para o caso com restrição ao escoamento para ilustração do alongamento presente nos elementos de área.

O alongamento foi tal que a malha em todo sistema evitava células com razão de aspecto maiores que 5:1. Elementos mais alongados eram construídos mais próximos à saída e entrada do sistema, regiões de menor interesse para o trabalho e de menores gradientes de velocidade, portanto, menos suscetíveis aos erros numéricos durante o procedimento de solução.

Construindo-se a malha desse modo, somente o comprimento utilizado para geração da malha na região de junção dos condutos representa consideravelmente bem as características da malha em todo o sistema.

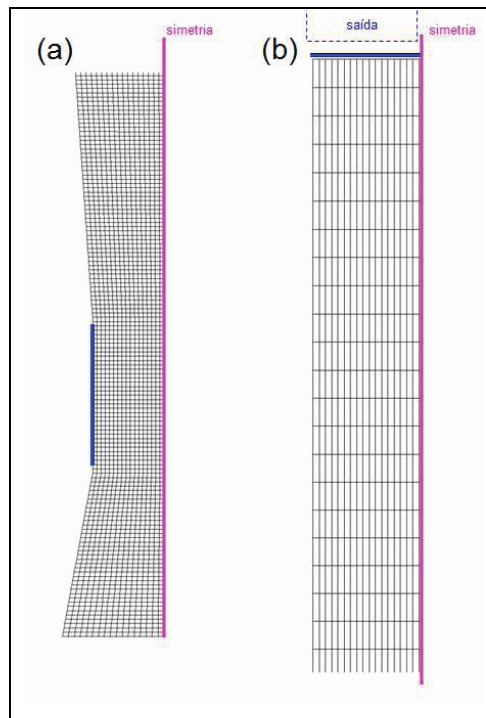


Figura 3.8 – Malha bidimensional para o caso com Venturi. a – proximidade da garganta do Venturi (região de junção dos condutos). b – proximidade da saída do trecho ascendente.

A Tabela 3.2 apresenta o número total de células para malhas com diferentes refinamentos na junção dos condutos.

Tabela 3.2 – Número de células utilizadas nas simulações bidimensionais.

Alimentador Venturi*		Sem restrição	
Refinamento na garganta (mm)	Número de células	Refinamento na entrada (mm)	Número de células
0.5	65340	1	20138
1	22168	2	11674

*restrição usada como alimentador

Simulações tridimensionais

A Figura 3.9 mostra a malha utilizada nas simulações tridimensionais para a região próxima à junção dos condutos.

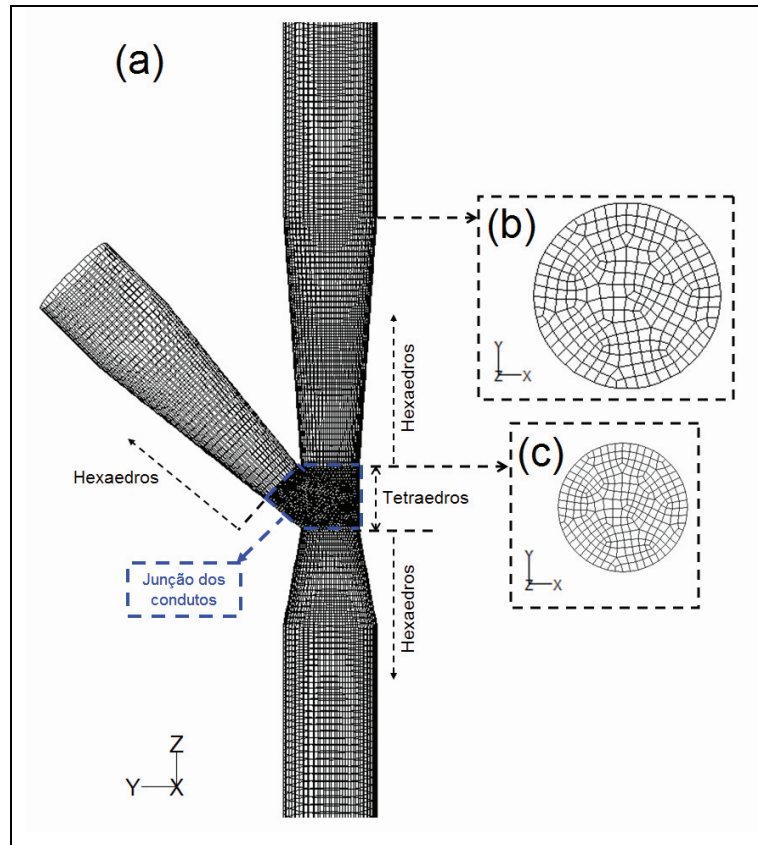


Figura 3.9 – Malha de 2mm utilizada no sistema tridimensional. a – região próxima à junção dos condutos. b – malha para a superfície de contato entre o cone divergente e o trecho vertical. c – malha para a superfície de contato da junção dos condutos com o cone divergente do alimentador.

Malha tetraédrica foi utilizada na região de junção dos condutos. A malha tetraédrica foi necessária devido à complexidade geométrica desta região do domínio computacional. Entretanto, uma camada piramidal de células nas faces que unem o volume de junção dos condutos aos troncos de cone que constituem o Venturi permitiu a utilização de malha hexaedrica nas demais regiões do sistema.

O procedimento de construção da malha envolvia a divisão das arestas circulares que delimitavam a região de junção dos condutos, como a aresta da superfície da Figura 3.9.c, em segmentos que possuíam um comprimento específico. Todas as três arestas eram divididas com o mesmo espaçamento para a construção da malha.

As malhas nas três superfícies circulares que uniam a junção dos condutos às regiões cônicas do alimentador foram então construídas por quadriláteros irregulares, como aquela apresentada na Figura 3.9.c.

A seguir a malha do volume de junção dos condutos foi construída. Ou seja, a malha na região possuía células tetraédricas, mas com células piramidais (bases de quadriláteros) na junção com regiões cônicas.

Não foi possível obter 100% da malha tetraédrica com volume maior que o das partículas mesmo para a malha construída com base em uma divisão de 2mm na junção dos condutos, que foi a malha mais grosseira utilizada.

A razão para isso está relacionada à utilização de malha tetraédrica em região de geometria complexa e o fato da simulação tratar do escoamento de material grosseiro. Assim, o menor refinamento na garganta significaria que a malha precisaria ser muito grosseira no restante do domínio computacional.

Depois da construção da malha na região de junção dos condutos as malhas nas entradas e saídas cônicas do alimentador foram construídas.

A malha nos volumes cilíndricos do sistema (entrada do ar e no *trecho ascendente*), ou seja regiões de malha hexaédrica, foram construídas com a mesma lógica das malhas bidimensionais: células se alongando à medida que se distanciavam da região de junção dos condutos, mas evitando células com razão de aspecto maiores que 5:1.

Foram utilizadas diferentes divisões das arestas para construção de malhas em diferentes refinamentos de modo similar ao realizado na construção das malhas 2D. Assim, do mesmo modo que nas malhas para sistemas bidimensionais, a definição do comprimento utilizado para construção da malha na região de junção dos condutos é representativa da malha no resto do sistema.

A Tabela 3.3 apresenta detalhes das características das malhas utilizadas no sistema tridimensional, assim como o comprimento do trecho ascendente simulado e tempo computacional.

Por fim, o Apêndice C traz informações sobre a infra-estrutura computacional utilizada nas simulações.

Tabela 3.3 – Características das malhas tridimensionais utilizadas nas simulações do escoamento bifásico, comprimento do trecho vertical simulado e tempo computacional para cada simulação (taxa de evolução).

Base de construção	2mm	1,5mm	1,2mm
Menor volume de célula	1,879 x 10 ⁻¹⁰ m ³ Local: garganta	6,216 x 10 ⁻¹¹ m ³ Local: garganta	1,474 x 10 ⁻¹¹ m ³ Local: garganta
Maior volume de célula	1,893x10 ⁻⁷ m ³ Local: entrada de ar no sistema	8,682x10 ⁻⁸ m ³ Local: entrada de ar no sistema	3,639 x 10 ⁻⁸ m ³ Local: entrada de ar no sistema
Número total de células	228077	405945	485443
Número total de faces	686247	1187359	1397770
Número total de nós	233612	384657	440146
Célula de maior assimetria (Eq.Size)	0,756 Local: garganta	0,776 Local: garganta	0,834 Local: garganta
Células de alta assimetria	3 (>0,75) Local: junção dos condutos	2 (>0,75) Local: garganta	10 (>0,75) Local: junção dos condutos
Comprimento trecho vertical (m)	3,75 (completo) Figura 3.6	2,6	0,8
Taxa de evolução temporal (s/dia)*	1,18	0,109	0,131

*média aproximada obtida para (segundos de tempo real de escoamento por dia de simulação)

3.2.2 Modelos e parâmetros físicos.

Hipótese de rápida diluição na entrada dos sólidos

A dispersão da fase sólida, estando em uma razão de carga mássica de sólidos extremamente reduzida justifica boa parte das hipóteses da modelagem realizada.

Resultados experimentais de *Lopes et al. (2007)* e *Lopes et al. (2011)* garantem a diluição da fase sólida como hipótese no sistema experimental utilizado. Assim, assumiu-se a rápida diluição da fase sólida na alimentação, hipótese essa verificada nas próprias simulações.

A Figura 3.10 apresenta os campos escalares para fração de sólidos

obtidos como solução (numérica) para o escoamento do sólido próximo a região de alimentação.

Estes resultados foram inseridos nesta seção para justificar a hipótese de diluição mencionada e que levou, por exemplo, à aplicação do modelo de turbulência k- ϵ para fase secundária (sólidos) dispersa e também do arraste entre as fases proposto por Wen & Yu (1966).

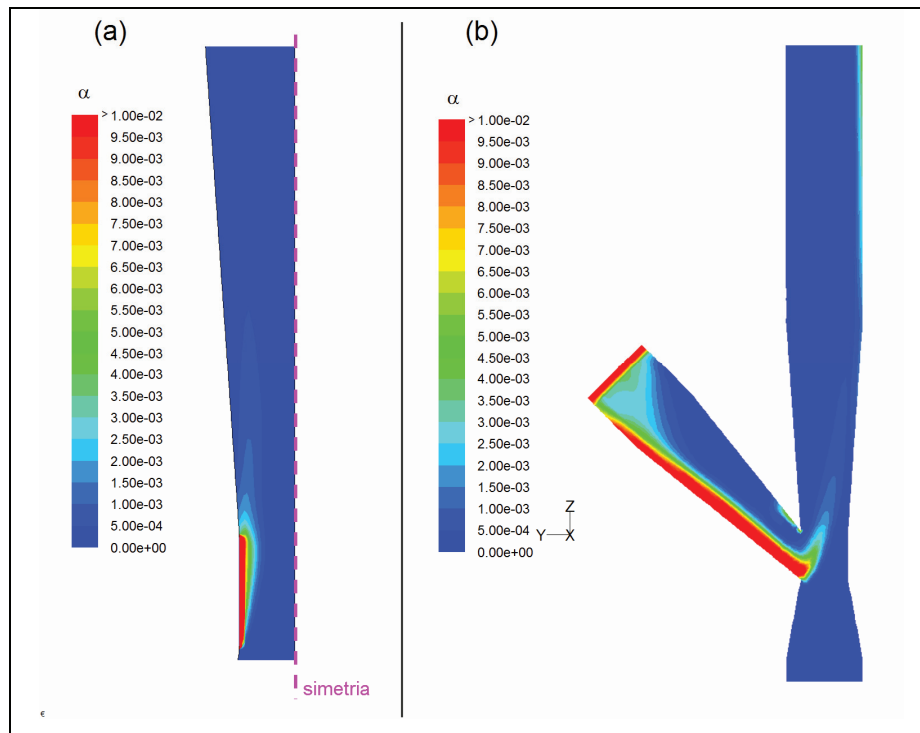


Figura 3.10 - Campos escalares de fração de sólidos obtidos por simulações na região próxima à alimentação na garganta de um dispositivo Venturi. a – caso com simetria. b – caso tridimensional (superfície S_y).

De fato a fração de sólidos cai de 0,6 para valores de 0,01 ou inferiores muito próximo à entrada do trecho ascendente, tanto no caso bidimensional como tridimensional.

Modelos utilizados nas simulações

O objetivo desta seção é somente a apresentação geral dos modelos utilizados.

A maior parte dos equacionamentos é apresentada com o objetivo de explicitar hipóteses utilizadas e contextualizar os modelos aplicados na construção da tese frente aos modelos mais gerais para simulação de

escoamentos multifásicos.

No entanto, detalhes acerca do desenvolvimento matemático e da interpretação física dos termos foram omitidos. Mais detalhes sobre os modelos utilizados podem ser obtidos no manual de usuário do Fluent 6.3 (*Fluent, 2005*).

O Quadro 3.1 apresenta os modelos diferenciais obtidos a partir do balanço de massa e momento em cada fase. Algumas hipóteses já foram realizadas sobre o sistema de equações para modelagem de um escoamento multifásico genérico de n fases:

- escoamento bifásico de uma fase granular (sólida) e uma fase fluída (ar);
- não há troca de massa entre as fases;
- sistema sem geração de massa, por exemplo, por reação (termo fonte nulo);
- força virtual de adição à massa (*added-mass force*), ou simplesmente “força de massa virtual”, foi desprezada nos balanços de momento porque o escoamento ocorre em meio gasoso (*Martin & Williams, 2009*);
- forças de ascensão (*lift force*) foram desprezadas para efeito de simplificação pois sua convergência é computacionalmente custosa (*Fluent User’s Guide, 2005*);
- única força de campo (“externas”) relevante era devida ao campo gravitacional, representado pela aceleração da gravidade no sistema.

Quadro 3.1 - Modelo geral do escoamento bifásico gás-sólido (balanço de massa e momento).

<u>Continuidade para fase granular</u>	
$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$	(1)
<u>Continuidade para fase fluída (ar)</u>	
$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0$	(2)
<u>Conservação de momento para fase granular</u>	
$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \vec{R}_{fs}$	(3)

Continuação do Quadro 3.1

Conservação de momento para fase fluída

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + \vec{R}_{sf} \quad (4)$$

“Continuidade volumétrica”

$$\alpha_f + \alpha_s = 1 \quad (5)$$

Terceira lei de Newton para interação entre fases

$$\vec{R}_{fs} = -\vec{R}_{sf} \quad (6)$$

Forma geral para a força de interação entre fases

$$\vec{R}_{fs} = K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (7)$$

O modelo proposto por *Wen & Yu (1966)* foi utilizada para inclusão dos efeitos de interação das fases por arraste. O Quadro 3.2 apresenta as equações deste modelo.

Quadro 3.2 - Modelo para o arraste entre fases utilizado (*Wen & Yu, 1966*).

Coeficiente de troca de momento fluido-sólido

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} (\alpha_f)^{-2,65} \quad (8)$$

Coeficiente de arraste (C_D)

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f \text{Re}_s} [1 + 0,15(\alpha_f \text{Re}_s)]^{0,687} \quad (9)$$

Número de Reynolds

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (10)$$

Todas as fases foram tratadas como fluidos Newtonianos-Stokesianos, como geralmente é usual mesmo no escoamento gás-sólido (*Milioli, 2006*). Assim, a equação constitutiva para o tensor das tensões viscosas pode ser encontrada em diversas referências (*Bird et al., 2004*, por exemplo).

O modelo de tensões da fase granular precisa ser complementado, o que foi feito considerando-se a teoria cinética granular, que faz analogia a teoria cinética dos gases. Assim, as tensões da fase sólida são deduzidas por analogia ao movimento randômico e choques entre moléculas.

A energia cinética relacionada às flutuações de velocidade são representadas por uma “pseudo-temperatura”, denominada *temperatura granular* (θ_s), que é proporcional ao quadrado médio das flutuações de velocidade do movimento das partículas.

A equação geral de transporte para temperatura granular pode ser encontrada em *Lun et al. (1984)* ou *Ding & Gidaspow (1990)*, entre outros trabalhos.

Entretanto, as simulações desta tese utilizaram a expressão algébrica para temperatura granular (*Syamlal et al, 1993*), que é obtida a partir da equação geral assumindo que a energia granular é dissipada localmente (desprezando convecção e difusão da mesma). Esta simplificação é largamente utilizada e tem como objetivo a simplificação do sistema de equações que definem o escoamento gás-sólido.

A equação constitutiva para o tensor das tensões viscosas da fase granular necessita de uma estimativa para viscosidade *bulk*, que caracteriza a resistência da fase granular frente à compressão e expansão. Definido o modelo para temperatura granular, utilizou-se, então, a equação (11), que foi proposta por *Lun et al. (1984)*.

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_s) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{0.5} \quad (11)$$

Além da viscosidade *bulk* também a viscosidade da fase granular e a pressão precisam ser definidas para complementação do modelo de tensões da fase particulada.

A pressão para fase sólida pode ser determinada por (12), como propôs *Lun et al. (1984)*.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (12)$$

Em que a função de distribuição radial ($g_{0,ss}$) utilizada foi proposta por Ogawa *et al.* (1980).

A viscosidade granular pode ser considerada a soma do efeito de colisão, efeito cinético e de atrito:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (13)$$

A viscosidade friccional foi desprezada por somente ser relevante em escoamentos com alta densidade (fração de sólidos próxima ao limite máximo de empacotamento). As equações para os demais termos da equação (13) estão na Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Modelo para a viscosidade granular (Gidaspow *et al.*, 1992).

Viscosidade por efeitos de colisão

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{0.5} \quad (14)$$

Viscosidade por efeito cinético

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (15)$$

Os efeitos de turbulência foram inclusos através de um modelo sob hipótese de escoamento diluído de material granular, que já estava implementado no simulador Fluent.

Neste caso, considera-se que a maior influencia nas flutuações para a fase secundária seja devida a influencia da fase fluída. O modelo foi adotado para o sistema em estudo tendo em vista a hipótese de rápida diluição na entrada da fase sólida no transportador.

O sistema de equações do modelo de turbulência considerando-se a fase secundária dispersa (diluída) assume uma versão simplificada do modelo k- ϵ para fase contínua. Enquanto, a descrição da fase dispersa é realizada pela teoria de Tchen (Hinze, 1975)

O Quadro 3.4 apresenta as equações para o modelo de turbulência para

fase contínua.

Quadro 3.4 – Modelo para turbulência da fase contínua.

Tensor das tensões de Reynolds para fase fluída

$$\overline{\tau}_f = -\frac{2}{3}(\alpha_f \rho_f k_f + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} \nabla \cdot \vec{v}_f) \overline{I} + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) \quad (16)$$

Viscosidade turbulenta

$$\mu_{f,t} = \rho_f C_\mu \frac{k_f}{\varepsilon_f} \quad (17)$$

$$C_\mu = 0,09 \quad (18)$$

Modelo para k (modificado)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f k_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f k_f) &= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_K} \nabla k_f \right) \\ + \alpha_f G_{k,f} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \Pi_{k,f} & \end{aligned} \quad (19)$$

Modelo para ε (modificado)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \varepsilon_f) &= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_K} \nabla \varepsilon_f \right) \\ + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_1 G_{k,f} - C_2 \rho_f \varepsilon_f) + \alpha_f \rho_f \Pi_{\varepsilon,f} & \end{aligned} \quad (20)$$

Influência da fase particulada em k

$$\Pi_{k,f} = \frac{K_{fs}}{\alpha_f \rho_f} (k_{fs} - 2k_f + \vec{v}_{fs} \cdot \vec{v}_{dr}) \quad (21)$$

Influência da fase particulada em ε

$$\Pi_{\varepsilon,f} = C_3 \frac{\varepsilon_f}{k_f} \Pi_{k,f} \quad (22)$$

$$C_3 = 1,3 \quad (23)$$

Geração de energia cinética turbulenta

$$G_{k,f} = \mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) : \nabla \vec{v}_f \quad (24)$$

Continuação do Quadro 3.4

Velocidade drift

$$\vec{v}_{dr} = - \left(\frac{D_s}{\sigma_{fs} \alpha_s} \nabla \alpha_s - \frac{D_f}{\sigma_{fs} \alpha_f} \nabla \alpha_f \right) \quad (25)$$

$$\sigma_{fs} = 0,75 \quad (26)$$

Escala da turbulência

$$\text{Escala de tempo: } \tau_{t,f} = \frac{3}{2} C_\mu \frac{k_f}{\varepsilon_f} \quad (27)$$

$$\text{Escala de comprimento: } L_{t,f} = \sqrt{\frac{3}{2} C_\mu \frac{k_f^{3/2}}{\varepsilon_f}} \quad (28)$$

O Quadro 3.5 apresenta as equações para o modelo de turbulência para fase granular.

Quadro 3.5 – Modelo de turbulência para fase dispersa.

Escala de tempo relacionada a efeitos inerciais atuando sobre a partícula

$$\tau_{F,sf} = \alpha_s \rho_s K_{fs}^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + Cv \right) \quad (29)$$

$$Cv = 0,5 \quad (30)$$

Escala de tempo para interação de vórtices e a partícula

$$\tau_{t,sf} = \frac{\tau_{t,s}}{\sqrt{1 + C_\beta \xi^2}} \quad (31)$$

$$C_\beta = 1,8 - 1,35 \cos^2 \theta \quad (32)$$

$$\xi = \frac{\overline{|v_{fs}|} \tau_{t,s}}{L_{t,f}} \quad (33)$$

Energia cinética turbulenta para fase particulada (Simonin & Viollet, 1990)

$$k_s = k_f \left(\frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (34)$$

$$k_{sf} = 2k_f \left(\frac{b + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (35)$$

Continuação do Quadro 3.5

$$\eta_{sf} = \frac{\tau_{t,fs}}{\tau_{F,fs}} \quad (36)$$

$$D_{t,sf} = \frac{1}{3} k_{sf} \tau_{t,sf} \quad (37)$$

Difusividade da fase particulada

$$D_s = D_{t,sf} + \left(\frac{2}{3} k_s - b \frac{1}{3} k_{sf} \right) \tau_{F,sf} \quad (38)$$

Parâmetros físicos

A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros físicos utilizados nas simulações 2D e 3D.

Tabela 3.4 – Parâmetros físicos das simulações.

Parâmetro	Descrição	Valor
e_{ss}	Coefficiente de restituição	0,9
ρ_s (Kg/m ³)	Densidade de (partícula)	2512
ρ_f (Kg/m ³)	Densidade do fluido	1,14 *
μ_f (Pa s)	Viscosidade do ar	$1,9 \times 10^{-5}$ *
d_s (m)	Diâmetro de partícula	0,001 (1mm)
Ψ	Esfericidade	1

* estimação para temperatura de 60°C por dados de Perry, 1999.

3.2.3 Condições de contorno

Os contornos utilizados para as duas entradas eram de velocidade prescrita.

A fração volumétrica de fase granular foi considerada nula no contorno para entrada de ar (parte inferior do leito) e as condições de turbulência da fase fluida foram calculadas por correlações (*Fluent User's Guide, 2005*) como indicam as equações a seguir.

$$l_{t,f} = 0,16 (R_{ef})^{-1/8} \quad (39)$$

$$L = 0,07 D \quad (40)$$

A fração de fase granular utilizada no contorno de entrada de sólidos foi de 0,6 (comum em leitos deslizantes). A velocidade atribuída a ambas as fases era normal à superfície do contorno e com módulo calculado para fornecer a vazão de sólidos utilizada.

Outras variáveis no contorno da entrada de sólidos foram definidas em níveis relativamente baixos, representando a entrada de um leito deslizante no sistema. A temperatura granular foi fixada em $0,0001\text{m}^2/\text{s}^2$ e as condições de turbulência para fase gasosa em 0,2% de intensidade turbulenta.

O contorno na saída do sistema foi o de pressão prescrita, em que se considerou a pressão relativa nula em relação à atmosférica. O contorno que considera a saída de sistemas para condição de escoamento desenvolvido (*outflow*) não é indicado para escoamentos multifásicos no sistema simulado (*Fluent User's Guide, 2005*).

Dois coeficientes de especularidade distintos foram utilizados para condição de contorno na parede: 0 e 0,2; para análise de sensibilidade paramétrica.

O coeficiente de especularidade refere-se à condição de contorno nas paredes para equações de momento da fase particulada. O coeficiente de especularidade é tão próximo de zero (com valor máximo de 1) quanto menos rugosas forem as paredes do sistema e, portanto, quão mais próximos os choques das partículas individuais com as paredes forem de colisões especulares.

3.2.4 Solução numérica

As simulações foram realizadas em programa comercial Fluent 6.3 e geração de malha em Gambit 2.3.

As soluções foram obtidas pelo método *coupled SIMPLE*. Além disso, utilizou-se discretização Green-Gauss baseada nos nós.

Em termos numéricos, as aproximações utilizadas na equação de

momento e de energia cinética turbulenta (k) para o fluido foram de segunda ordem. A seção 4.2.2 justifica a utilização da aproximação de segunda ordem para k . As demais aproximações foram de primeira ordem para redução do tempo computacional das simulações.

O método de solução para regime permanente mostrou-se instável. Além disso, não houve convergência para solução fisicamente consistente do problema utilizando grandes intervalos de tempo (abordagem pseudo-transiente), pois os sólidos não eram transportados ao longo do trecho ascendente.

Assim, adotou-se a solução transiente com intervalo de 0,0001 segundos. Os campos de partida para solução numérica eram da solução do regime permanente para o escoamento monofásico do ar no sistema.

O critério de convergência para cada instante de tempo foi o resíduo escalonado máximo de 1×10^{-3} em todas as equações do modelo. *Fluent User's Guide (2005)* indica que esse é o resíduo adequado para maioria das simulações em CFD. Na prática, os maiores resíduos concentravam-se nas equações de momento da fase particulada, mas geralmente atingiam no máximo 2×10^{-4} a 4×10^{-4} .

As soluções para escoamento bifásico em instante de tempo fixo foram apresentadas para 9 segundos de escoamento.

Não existem estudos detalhados sobre o comportamento do sistema em estudo no início da injeção de material sólido. Deste modo, não existe a expectativa de que as soluções no início do processo iterativo representem o avanço temporal do sistema com precisão. Assim, também não é esperado que os nove segundos mencionados, ou mesmo instantes seguintes, seja a solução exata do comportamento do sistema real em nove segundos de operação.

Entretanto, a observação da solução numérica ao longo do tempo de escoamento indicou que quatro segundos bastavam para estabilização do comportamento fluidodinâmico no sistema. Assim, adotou-se nove segundos como sendo o suficiente para apresentação geral de resultados. Ressalta-se que as simulações bidimensionais e a simulação 3D com a malha mais grosseira e com coeficiente de especularidade nulo foram resolvidas e analisadas até instantes de tempo mais longos e as mesmas características de escoamento vistas em 9 segundos foram observadas até vinte e dois segundos

de escoamento.

3.2.5 Análise de resultados do CFD

As definições mais importantes para as análises dos resultados de CFD são as das superfícies utilizadas para visualização de campos escalares e vetoriais e dos segmentos de reta utilizados para apresentação de perfis de variáveis.

Segmentos de reta

Neste caso, entre os segmentos mais importantes está o eixo do sistema da Figura 3.6. Este segmento será denominado eixo do trecho ascendente, ou eixo do transportador.

Os demais segmentos de reta foram definidos por duas letras e quando necessário também um número. A utilização das letras tem como objetivo tornar a associação de sua localização mais simples ao leitor.

A primeira letra faz menção ao local (região) do sistema em que o segmento se encontra: “G” para garganta do alimentador; “C” para o tronco de cone de saída do alimentador Venturi (que termina no conduto vertical) e R para o trecho vertical. R faz menção ao termo *riser* (trecho ascendente em inglês).

Para referências com relação a cada uma das regiões mencionadas vide a Figura 3.1 e a correspondente abstração no domínio computacional apresentado na Figura 3.6.

A segunda letra representa o direcionamento do segmento de reta. A letra indica uma das três direções da referência dadas pelos vetores unitários \mathbf{x} , ou \mathbf{y} , ou \mathbf{z} . Assim, todos os segmentos definidos deste modo podem ser representados somente por um dos vetores unitário da base de referência $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. Os segmentos de reta na direção de \mathbf{x} e \mathbf{y} foram os mais relevantes nas análises de soluções do CFD.

Por exemplo, o segmento Gy é aquele na garganta do alimentador (G) e que está contido no plano da Figura 3.6. Deste modo, o perfil de uma variável para Gy só fará sentido se for apresentado em função de y (na direção \mathbf{y}).

Os dois pontos que definirão um segmento de reta serão os limites do

sistema computacional em análise, a menos que se determine o contrário.

Por fim, se mais de um segmento estiver na mesma região do sistema computacional, um número inteiro fará a distinção entre eles. Por exemplo, segmentos de reta Ry1, Ry2 e assim por diante são segmentos do *trecho ascendente*.

A Tabela 3.5 apresenta o deslocamento (na direção z) de cada segmento de reta utilizado na direção de **x** ou **y**. A coluna *line* apresenta a denominação utilizada nas definições dos segmentos de reta nas simulações e são apresentados somente para eventual necessidade futura de consulta às simulações realizadas.

Tabela 3.5 - Deslocamento de cada segmento de reta a partir da saída do tronco de cone de saída da peça de alimentação e a partir do t1. w representa ou x ou y.

segmento de reta	line	Deslocamento em z a partir da referência		Deslocamento em z a partir de t1	
		mm	m	mm	m
Gw	linha_garg_1	18	0,018	96,5	0,0965
Cw1	linha_cone_1	79	0,079	157,5	0,1575
Cw2	linha_cone_2	130	0,13	208,5	0,2085
Rw1	Linha 1	180	0,18	258,5	0,2585
Rw2	Linha 2	204	0,204	282,56	0,28256
Rw3	Linha 3	280	0,28	358,5	0,3585
Rw4	Linha_meio_metr	680	0,68	758,5	0,7585
Rw5	Linha 4	1180	1,18	1258,5	1,2585
Rw6	Linha 5	2180	2,18	2258,5	2,2585
Rw7	Linha 6	2800	2,8	2878,5	2,8785
Rw8	Linha 7	3180	3,18	3258,5	3,2585
Rw9	Linha8	3680	3,68	3758,5	3,7585

Superfícies

Com relação às superfícies, a Sy corresponde à superfície formada pela intersecção do plano definido por **y** e **z** com o domínio computacional.

A superfície Sx corresponde à superfície formada pela intersecção do plano definido por **x** e **z** com o domínio computacional.

As superfícies do tipo Sz correspondem às superfícies formadas pela intersecção do plano definido por **x** e **y** com o domínio computacional. Estas serão superfícies circulares em diferentes deslocamentos na direção z.

Para distinguir as diferentes superfícies Sz entre si, um número e uma letra foram utilizados. As letras e números têm a mesma finalidade que a

descrita para os segmentos de reta: a letra está associada à uma região do sistema e o número define a posição exata em z (segundo definido na Tabela 3.5).

Assim, Sz-C1 corresponde a seção do sistema na mesma posição em z dos segmentos de reta Cw-1, enquanto Sz-G estaria na mesma posição em z dos segmentos Gw.

4 Resultados e discussões

4.1 Resultados experimentais

4.1.1 Condições experimentais

A Tabela 4.1 apresenta resultados médios e de desvio padrão das variáveis que caracterizam as condições utilizadas nos ensaios experimentais (com e sem alimentação de sólidos).

Tabela 4.1 – Média e desvio padrão de variáveis relevantes dos ensaios experimentais realizados.

	Velocidade média		Vazão volumétrica*	Temperatura*
	Nominal	Medida*		
	m/s			
Sem sólidos	14,0	14,2 ± 0,2	113,8 ± 1,6	71,2 ± 1,4
	22,0	22,2 ± 0,2	177,9 ± 1,9	52,0 ± 1,1
	29,5	29,4 ± 0,3	235,2 ± 2,0	55,5 ± 0,9
	Máx - 38,0	38,2 ± 0,4	305,4 ± 3,2	61,3 ± 3,2
Com sólidos	14,0	14,4 ± 0,3	114,9 ± 2,1	70,5 ± 2,2
	22,0	22,1 ± 0,1	176,0 ± 0,8	54,9 ± 0,8
	29,5	29,5 ± 0,1	235,9 ± 0,3	59,5 ± 1,1
	Máx - 38,0	37,0 ± 0,2	295,9 ± 0,9	66,1 ± 1,4

* Intervalos de confiança para probabilidade de 95%.

A maior vazão de ar utilizada não era ajustada, ela era a capacidade máxima do sistema, ou seja, o direcionamento de toda a vazão para o transportador. Exatamente por isso a velocidade atingida para o escoamento bifásico era pouco menor do que aquela do escoamento monofásico, já que o escoamento das duas fases apresenta maior perda de pressão no leito.

4.1.2 Apresentação dos resultados para ensaios experimentais sem material particulado

A Figura 4.1 apresenta os resultados para pressão (relativa à atmosférica) e perda de pressão em referência à pressão em t1 em função da posição da tomada de pressão (deslocamento na direção principal, L, de cada ti).

Os dados foram obtidos por transdutores de pressão em várias réplicas de ensaios no transportador pneumático. Estes ensaios foram aqueles realizados

sem a alimentação de material particulado.

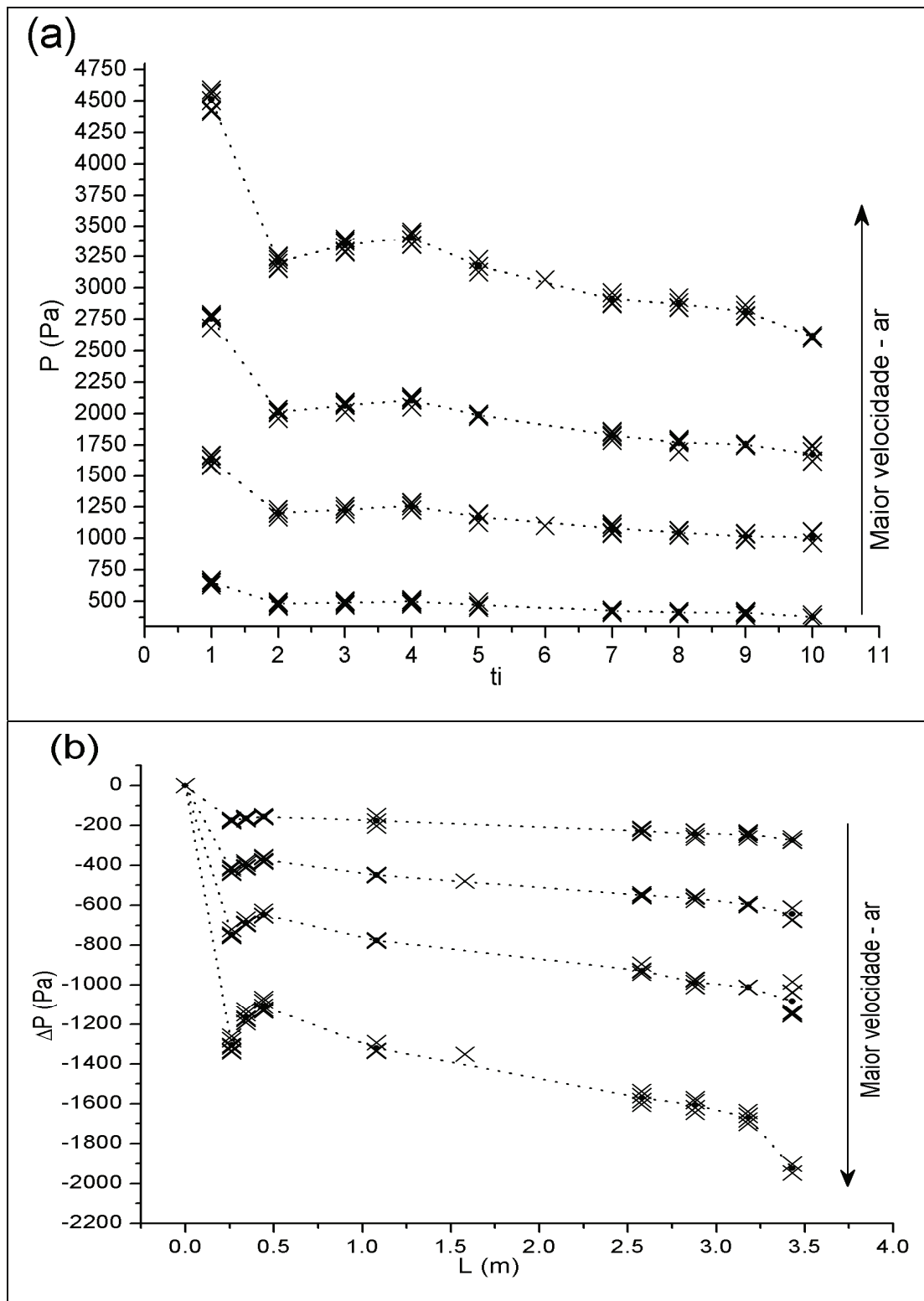


Figura 4.1 – Dados de pressão obtidos nos ensaios experimentais realizados sem material particulado. a – pressão em função da tomada da pressão. b - perda de pressão em função de L. As linhas ligam as médias em cada posição.

Entre t_1 e t_2 observa-se elevada perda de pressão local, pois nesta região

encontra-se o Venturi posicionado para alimentação de sólidos.

A Figura 4.2 mostra os resultados experimentais de pressão em função da posição de t_i já apresentados na Figura 4.1, mas cada nível de velocidade nominal apresentado separadamente com o objetivo de mostrar mais claramente a variabilidade dos dados.

As posições da tomada de pressão foram utilizadas como variáveis independentes ao invés do comprimento na direção do escoamento porque utilizando esta dependência é possível visualizar melhor os dados obtidos da entrada do transportador.

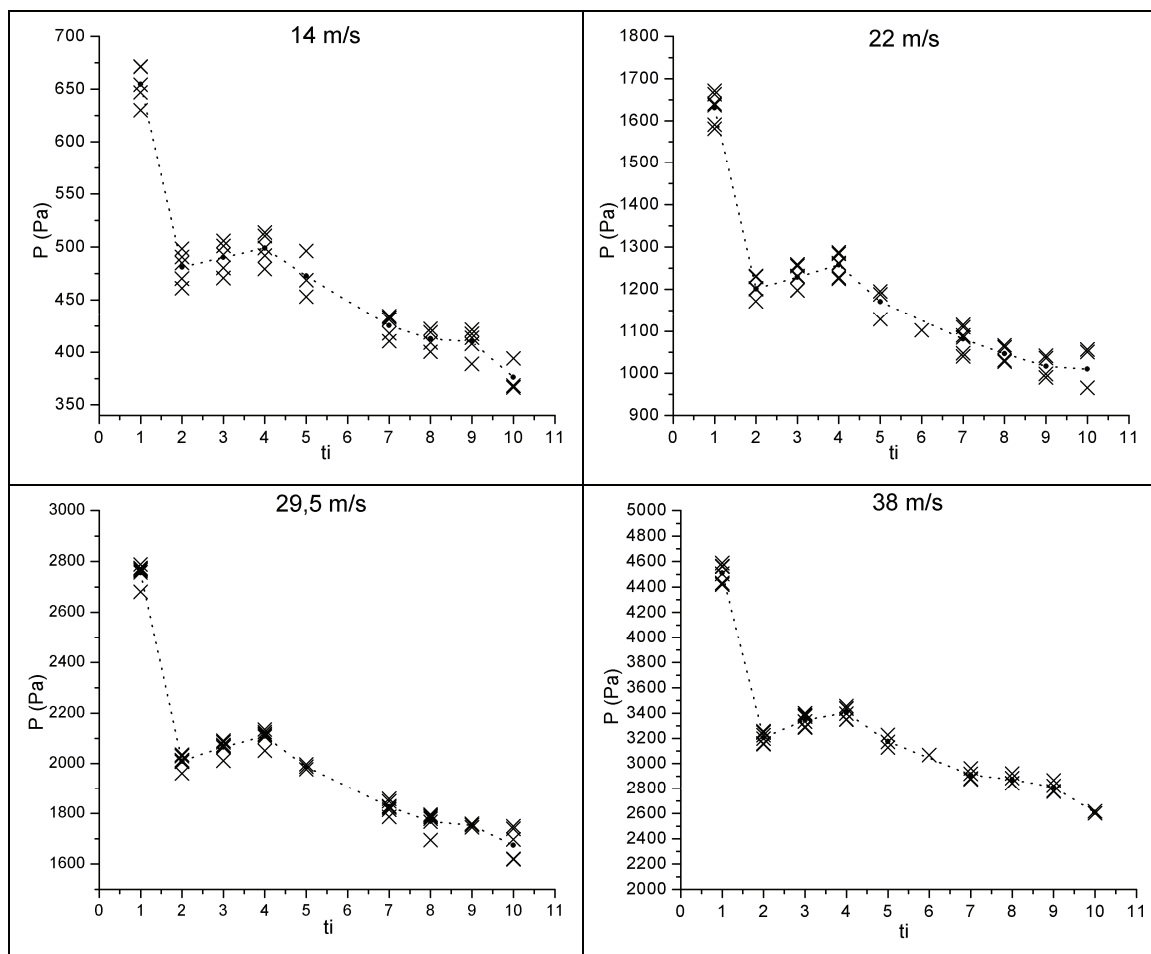


Figura 4.2 – Pressão e queda de pressão em função da tomada da pressão para os ensaios experimentais realizados sem material particulado: gráficos individuais para cada velocidade nominal. As linhas ligam as médias em cada posição.

Observa-se que a variabilidade é mais representativa em velocidades menores. Isto pode ser explicado devido à baixa queda de pressão associada à velocidade nominal de 14m/s, que torna mais importante a variabilidade das

medidas de pressão em termos relativos. Além disso, existe mais dificuldade em se ajustar o nível de vazão inferior com as válvulas presentes no sistema.

A maior variabilidade das medidas em termos relativos à perda de pressão dos trechos do transportador justifica o porquê da condição intermediária de vazão de ar (29,5m/s de velocidade média do ar) ter sido escolhida para simulações.

A Figura 4.3 apresenta a médias e barras de erro para a perda de pressão no sistema em ensaios sem particulado.

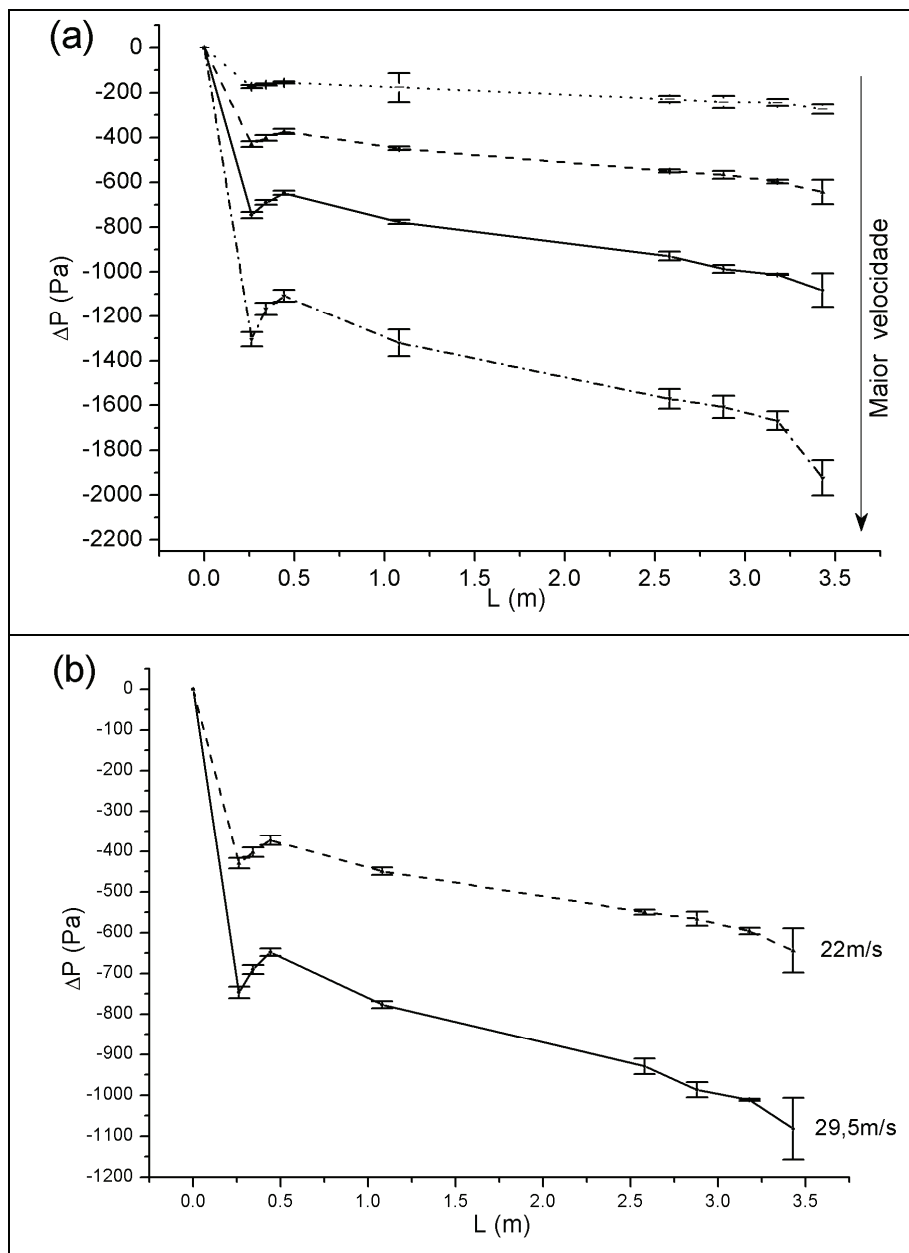


Figura 4.3 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados sem material particulado. a – todas as condições experimentais. b – condições de 22 e 29,5m/s.

Os valores calculados para a Figura 4.3 constam no Apêndice B, assim como outros dados importantes relativos às medidas experimentais.

A Tabela 4.2 apresenta os coeficientes de explicação do ajuste linear dos dados de perda de pressão (referentes à t1) em função de L utilizando-se diferentes trechos como região linear.

A inclusão de t3 ao ajuste fez com que R^2 caísse em todos os níveis de velocidade nominal exceto para a menor velocidade, caso em que os erros relativos eram muito elevados. Além disso, era possível perceber a tendência da queda de pressão em t3 ser sistematicamente menor do que a reta ajustada entre t4 e t9 previa. Deste modo, o efeito de t3 para a menor vazão de ar foi desprezado e ele foi excluído do trecho linear.

A inclusão de t10 reduziu R^2 em todas as condições, exceto para a menor velocidade. Assim, t10 foi excluído do trecho linear para cálculo da perda de pressão por comprimento nessa região. O decréscimo de R^2 com a inclusão de t10 foi ocasionado por sua proximidade da curva superior do trecho ascendente e também das conexões com válvula guilhotina.

Tabela 4.2 – Valores do coeficiente de explicação (R^2) para o modelo linear de ΔP em função de L nos diferentes trechos sob análise para determinação da linearidade.

		Velocidade nominal (m/s)			
		14	22	29,5	38
R^2 por trecho	t4 ao t9	0,894	0,984	0,982	0,975
	t3 ao t9	0,906	0,971	0,975	0,971
	t2 ao t9	0,886	0,928	0,927	0,874
	t4 ao t10	0,902	0,966	0,949	0,943

A Figura 4.4 apresenta os ajustes lineares para diferentes trechos sob análise para verificação da linearidade presentes na Tabela 4.2 para velocidade de 29,5m/s.

A diferença entre os coeficientes angulares para as retas da Figura 4.4 é muito pequena, mas a retirada de t10 e t3 do trecho linear garante rigorosidade ao cálculo de perda de pressão na região linear.

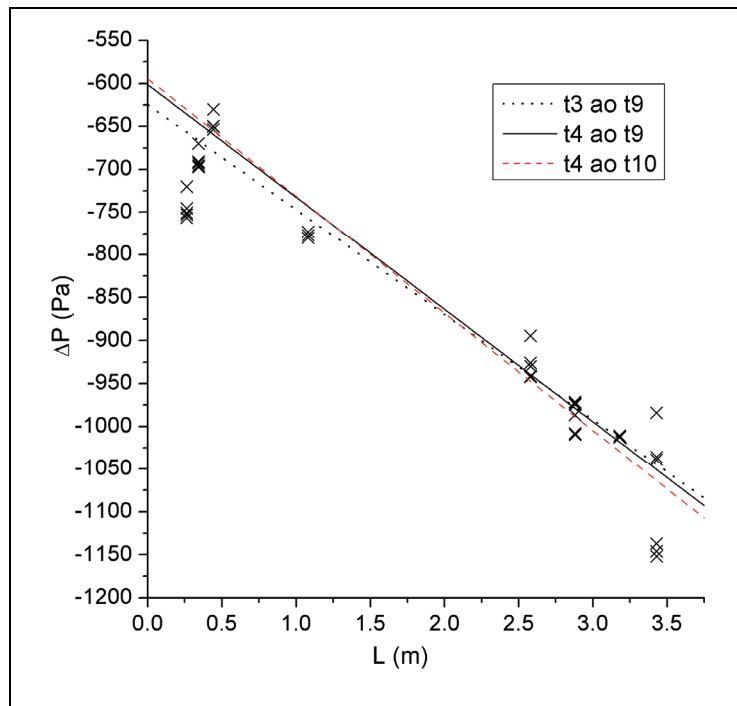


Figura 4.4 – Dados de perda de pressão em função de L com os ajustes lineares para diferentes trechos no transportador na velocidade nominal de 29,5m/s.

A Tabela 4.3 apresenta as estatísticas para perda de pressão por comprimento na região linear do trecho ascendente nos ensaios sem sólidos.

Tabela 4.3 – Perda de pressão por comprimento no trecho linear. Ajuste da reta para o trecho de t4 a t9 para ensaios sem particulado. Sendo n é o número total de amostras de pressão utilizadas no ajuste linear e s o erro padrão.

v_n	$\Delta P/L$ (Pa/m)*	s (Pa/m)	n
14	$-33,8 \pm 5,4$	2,5941	22
22	$-78,7 \pm 4,5$	2,1481	24
29,5	$-131,0 \pm 7,9$	3,8271	24
38	$-199,8 \pm 15,0$	7,1996	22

* intervalo de confiança para 95% de probabilidade

4.1.3 Apresentação dos resultados para ensaios experimentais com material particulado (1mm)

O sistema de alimentação tipo Venturi diferenciou-se do utilizado em *Lopes et al. (2011)* e *Lopes (2011)* (também em orientação vertical) pela inserção de material particulado na garganta do Venturi sem o cotovelo no conduto lateral, ou seja, a alimentação se deu diretamente a partir da lateral cônica inclinada (Figura 3.4).

A configuração com lateral inclinada tornou o regime denso na maior parte das posições utilizadas para a válvula de liberação de sólidos, sendo que o regime obtido se tornou diluído somente para válvula quase totalmente fechada. Por esta razão, a válvula foi aberta somente 3%.

A diferença na operação de *Lopes et al. (2011)* e os resultados deste trabalho evidenciam a forte dependência que a vazão de sólidos e consequentemente o comportamento fluidodinâmico do leito têm das características geométricas no conduto lateral, quando na ausência de dispositivos mecânicos de alimentação (como a válvula rotora).

A Figura 4.5 apresenta a vazão de sólidos em função da velocidade média do ar no sistema (utilização do dispositivo da Figura 3.4).

A vazão de sólidos foi afetada pela vazão de ar, característica esperada devido à ausência de dispositivos mecânicos de alimentação, ou de vazões secundárias de ar no conduto lateral (sem válvulas L, J etc).

A correlação linear ajustou a vazão de sólidos em função da vazão de ar com coeficiente de explicação (R^2) de 0.989, os dados e a correlação obtida podem ser vistos na Figura 4.5.

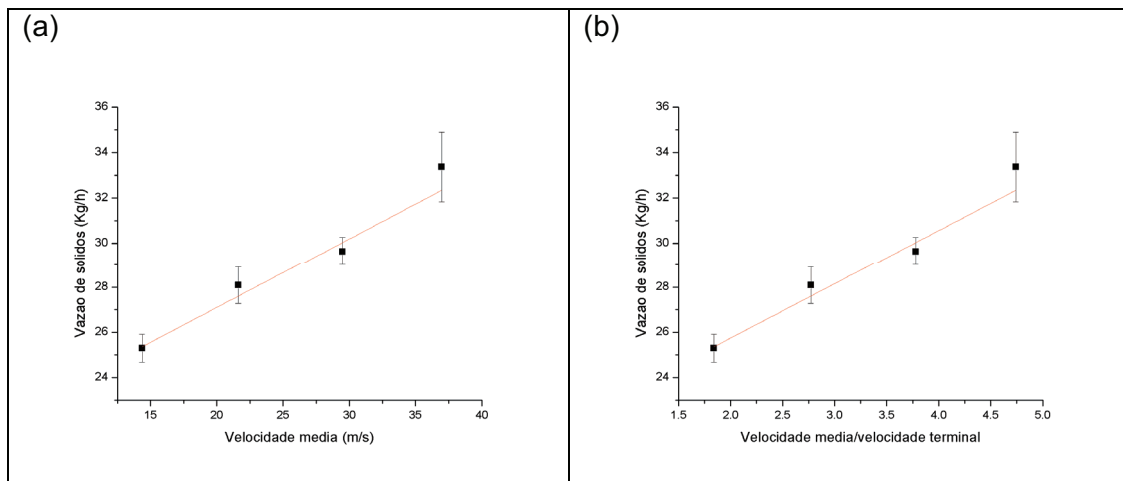


Figura 4.5 – Vazão de sólidos em função da velocidade do ar nos ensaios, barras de erros representam intervalo de confiança de 95%. a – velocidade média dos ensaios. b – velocidade adimensionalizada pela velocidade terminal (correlação de *Pettyjohn e Christiansen, 1948*).

Apesar da influência da velocidade do ar ser mensurável, a variação da vazão de sólidos é de somente 32% quando se passa da menor velocidade

nominal para a maior velocidade nominal.

Lopes et al. (2011) obtiveram aproximadamente 30% de variação da vazão de sólidos frente à mesma variação na velocidade média do ar para o dispositivo Venturi com lateral sem inclinação.

Apesar de terem obtido valores similares para a variação da vazão, a dependência funcional obtida por *Lopes et al. (2011)* para a vazão de sólidos e velocidade foi muito distinta da linear. Embora o trabalho não tenha fornecido ajuste funcional para os dados e a observação em questão ter sido realizada visualmente.

Mais importante que a própria diferença entre as correlações obtidas foi a tendência dos dados experimentais. A dependência da vazão de sólidos em relação à velocidade média do ar obtida por *Lopes et al. (2011)* foi decrescente, enquanto a obtida para o Venturi com conduto lateral inclinado foi crescente.

A necessidade de operar com a válvula de liberação de sólidos quase totalmente fechada forneceu vazões muito menores do que as de *Lopes et al. (2011)* para o dispositivo Venturi.

Na realidade, o dispositivo com lateral inclinada forneceu vazões equiparadas às maiores vazões do sistema operando sem restrição. Apesar disso, o sistema com lateral inclinada mostrou-se mais estável frente às alterações na velocidade do ar.

A relação funcional entre a vazão de sólidos e a velocidade (e consequentemente vazão) de ar mostrou ser mais simples para o dispositivo com a lateral inclinada, além de oferecer outra faixa de operação de vazão de sólidos para os mesmos níveis de vazão de ar.

A Figura 4.6 mostra os perfis de pressão obtidos ao longo do leito nos ensaios com inserção de material sólido.

Deste modo, conclui-se que, qualitativamente, não se obteve diferença nos perfis pela inclusão dos sólidos em linha, característica que já era esperada devido à diluição dos sólidos.

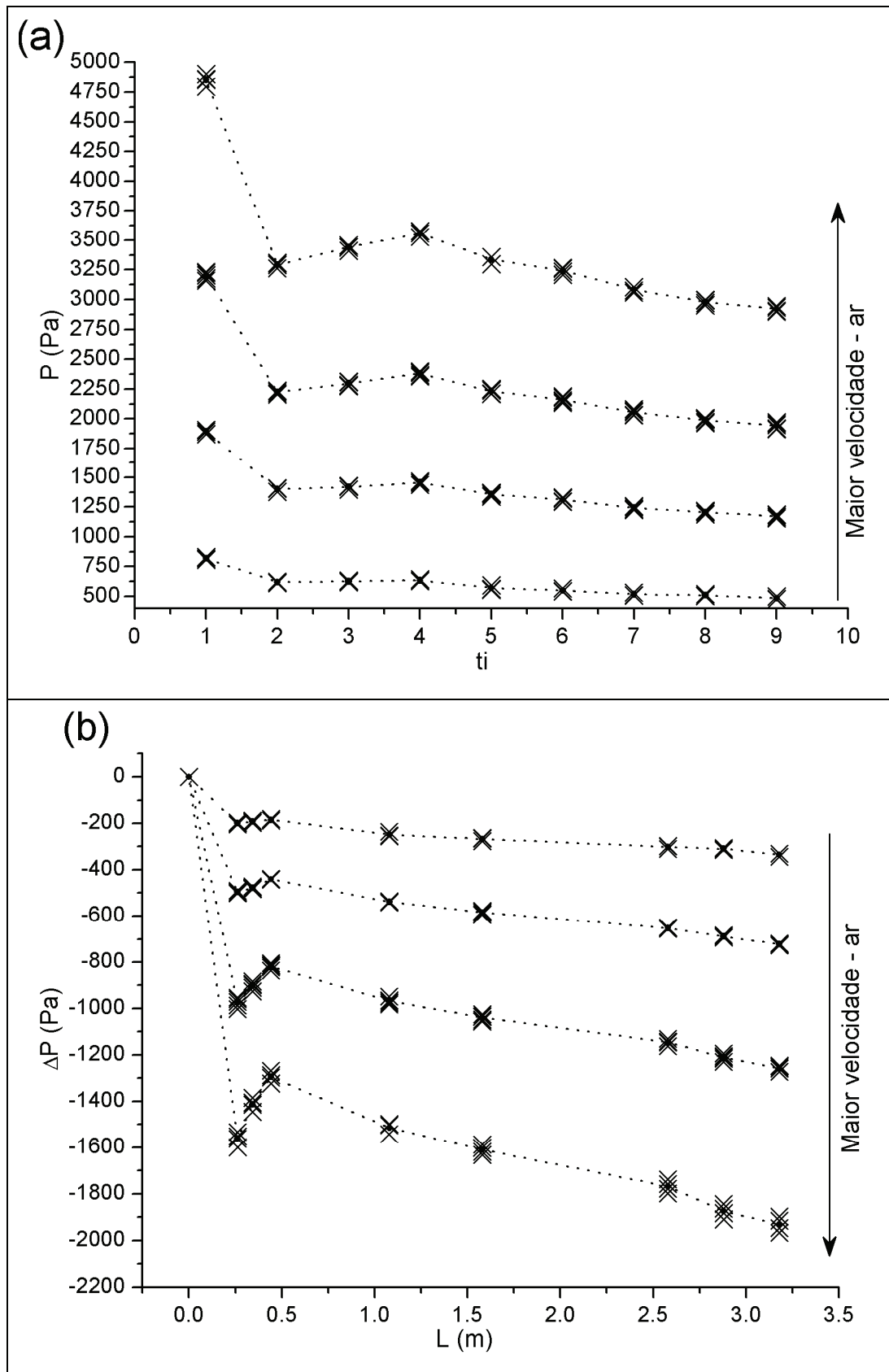


Figura 4.6 – Pressão e perda de pressão em função da tomada da pressão nos ensaios com material granular. Traços ligam os valores médios de pressão em cada posição.

Do mesmo modo que foi feito para os ensaios sem material sólidos, a Figura 4.7 mostra os dados experimentais de pressão em função da posição para cada nível de velocidade nominal apresentado separadamente.

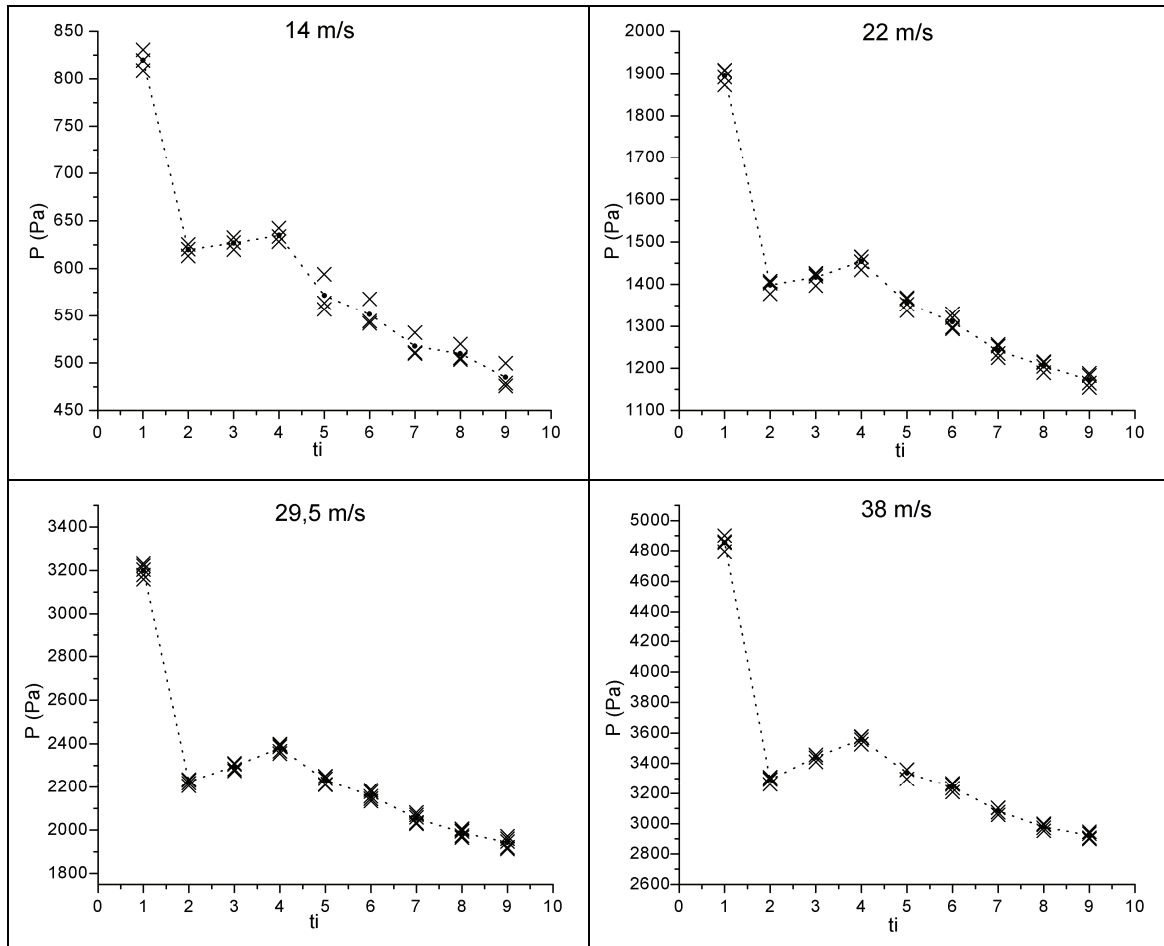


Figura 4.7 – Pressão e perda de pressão em função da tomada da pressão nos ensaios com material granular em linha. Cada velocidade nominal de ar apresentada em separado.

A incerteza, assim como nos ensaios sem material particulado, assume mais importância para o menor nível de velocidade.

Os dados para ensaios sem material particulado indicaram que t_{10} era perturbado pela proximidade do fim do trecho ascendente. Assim, t_{10} foi excluído das medidas com material particulado porque o interesse na tese era o estudo do trecho ascendente.

A Figura 4.8 apresenta a médias e barras de erro para a queda de pressão no sistema em ensaios com particulado. Os valores calculados

constam no Apêndice B, assim como outros dados importantes relativos às medidas experimentais.

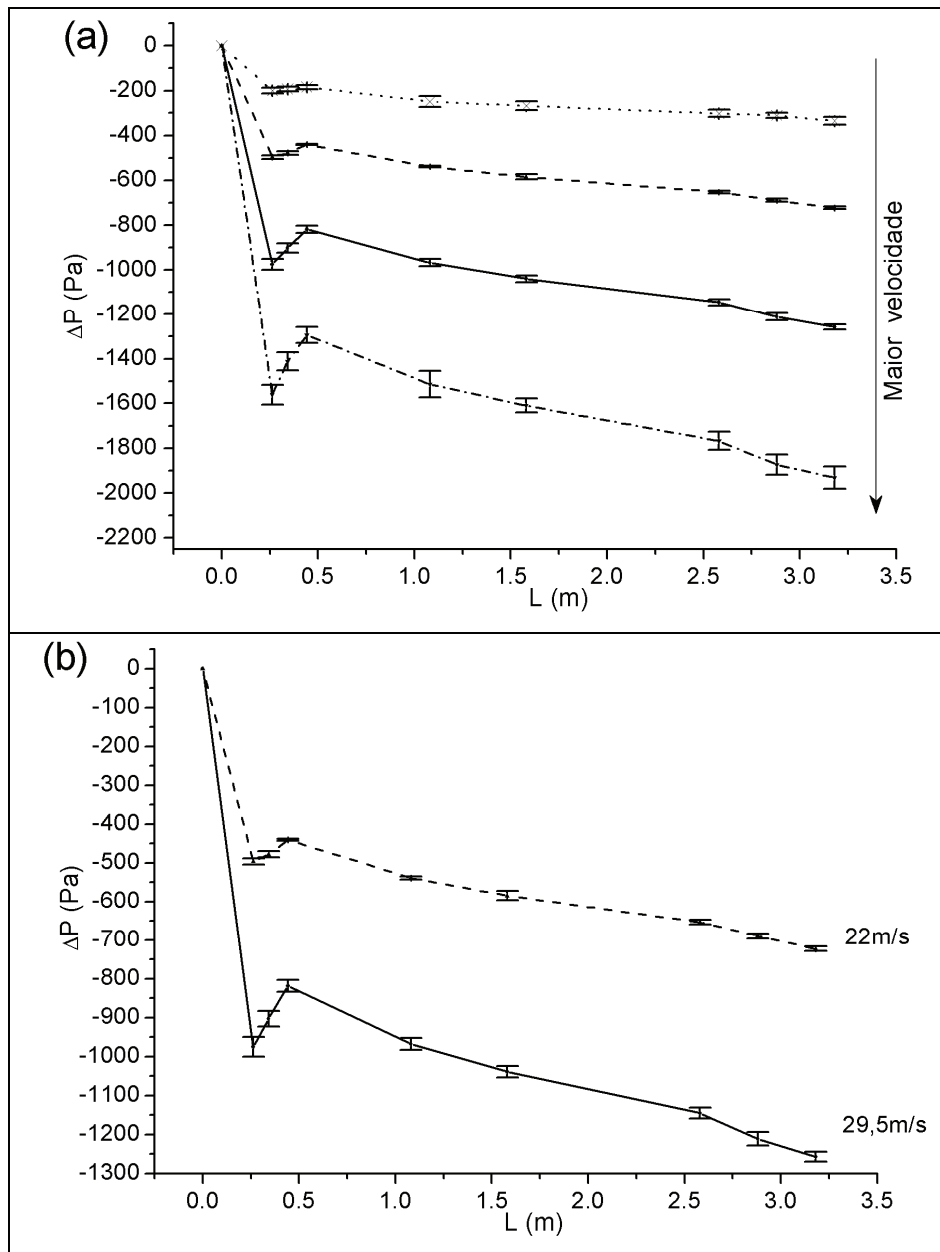


Figura 4.8 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados com material particulado. a – todas as condições experimentais. b – condições de 22 e 29,5m/s de velocidade nominal

A Tabela 4.4 apresenta os coeficientes de explicação do ajuste linear dos dados de perda de pressão (referentes à t_1) em função de L .

Tabela 4.4 – Valores do coeficiente de explicação (R^2) para o modelo linear de ΔP em função de L nos diferentes trechos sob análise para determinação da linearidade.

		Velocidade nominal (m/s)			
		14	22	29,5	38
R^2	t4 ao t9	0,935	0,979	0,977	0,974
	t3 ao t9	0,952	0,976	0,960	0,955
	t2 ao t9	0,956	0,961	0,890	0,851

Somente a análise da linearidade entre t3 à t9 é necessária na ausência de t10. Neste caso, observa-se que somente os ajustes de t4 a t9 forneceram R^2 maior do que 0,97 em todas as condições experimentais, exceto para menor velocidade de ar, cujos erros relativos eram elevados. Além disso, a Tabela 4.4 mostra que a inclusão de t3 na região linear reduziu o valor do coeficiente de explicação em todas as condições experimentais, exceto para a menor vazão utilizada.

Ressalta-se que o valor de queda de pressão para t3 apresentou desvio sistemático em relação à reta ajustada pelo trecho posterior em todos os ensaios realizados com sólidos, assim como havia sido obtido para os ensaios sem material particulado.

Deste modo, manteve-se a decisão de não utilizar t3 para calcular a perda de pressão por comprimento na região linear.

A Tabela 4.5 apresenta as estatísticas para perda de pressão por comprimento na região linear do trecho ascendente nos ensaios com sólidos.

Tabela 4.5 – Perda de pressão por comprimento no trecho linear. Ajuste da reta para o trecho de t4 a t9 para ensaios com particulado. Sendo n é o número total de amostras utilizadas no ajuste linear.

v_n	$\Delta P/L$ (Pa/m)*	s (Pa/m)	n
14	$-48,0 \pm 6,7$	3,2	18
22	$-95,4 \pm 6,3$	3,0	24
29,5	$-149,4 \pm 8,8$	4,3	30
38	$-220,2 \pm 16,5$	7,9	23

* intervalo de confiança para 95% de probabilidade

4.1.4 Comparação entre os ensaios com e sem material particulado

A Figura 4.9 apresenta estatísticas da queda de pressão para ensaios com ar e sólidos no mesmo gráfico.

Os perfis obtidos possuem grande similaridade em todos os casos. A diferença entre a perda de pressão do escoamento com sólidos e sem sólidos foi, portanto, somente quantitativa. Outros trabalhos obtiveram resultados similares (Lopes, 2007; Lopes, 2011; Lopes et al., 2011).

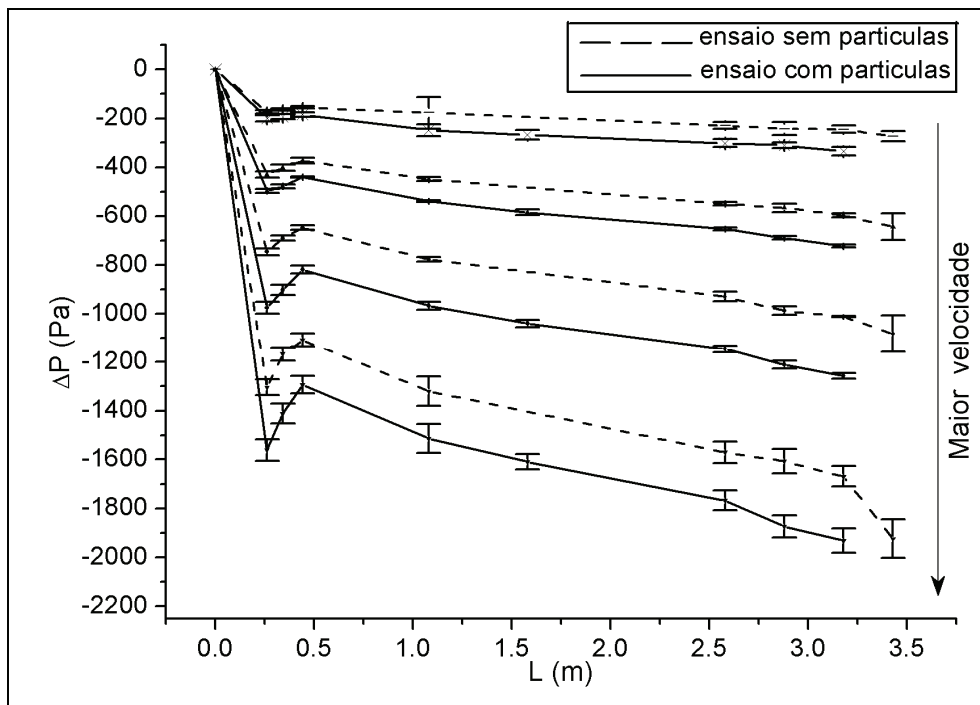


Figura 4.9 – Perda de pressão média com intervalo de confiança a 95% em função de L para os ensaios experimentais realizados com e sem material particulado.

4.2 Ensaios computacionais do escoamento de ar em geometrias características do transportador de sólidos

Esta seção apresenta os resultados para simulações do escoamento de ar em dispositivos Venturi e no alimentador Venturi da Figura 3.4. O objetivo é a verificação da estabilidade das malhas para o escoamento monofásico e a apresentação do comportamento do ar na ausência da fase sólida em geometrias características do leito fluidizado circulante.

A estabilidade da malha para o escoamento monofásico foi o ponto de partida para as decisões sobre quais malhas utilizar nas simulações do escoamento gás-sólido e para verificação da estabilidade desse escoamento com a malha.

Além disso, noções sobre a influencia que a geometria tem sobre o

escoamento, mesmo na ausência da fase sólida irão ajudar na visualização do escoamento multifásico, já que a fase sólida é pouco relevante para o escoamento da fase fluída em escoamentos com alta diluição.

Por fim, resultados experimentais da seção 4.1.2 serão utilizados para verificar a simulação de ar no sistema. A tendência obtida a partir da verificação das soluções numéricas de cada malha com resultados experimentais fornece uma estimativa da qualidade de verificação esperada no caso das simulações gás-sólido.

4.2.1 Resultados gerais do escoamento monofásico

A Figura 4.10.a apresenta os resultados do campo vetorial de velocidade da simulação do escoamento monofásico para a região de alimentação de sólidos. Ressalta-se que, neste caso, a superfície para alimentação de sólidos foi considerada com uma parede (hipótese de não escorregamento).

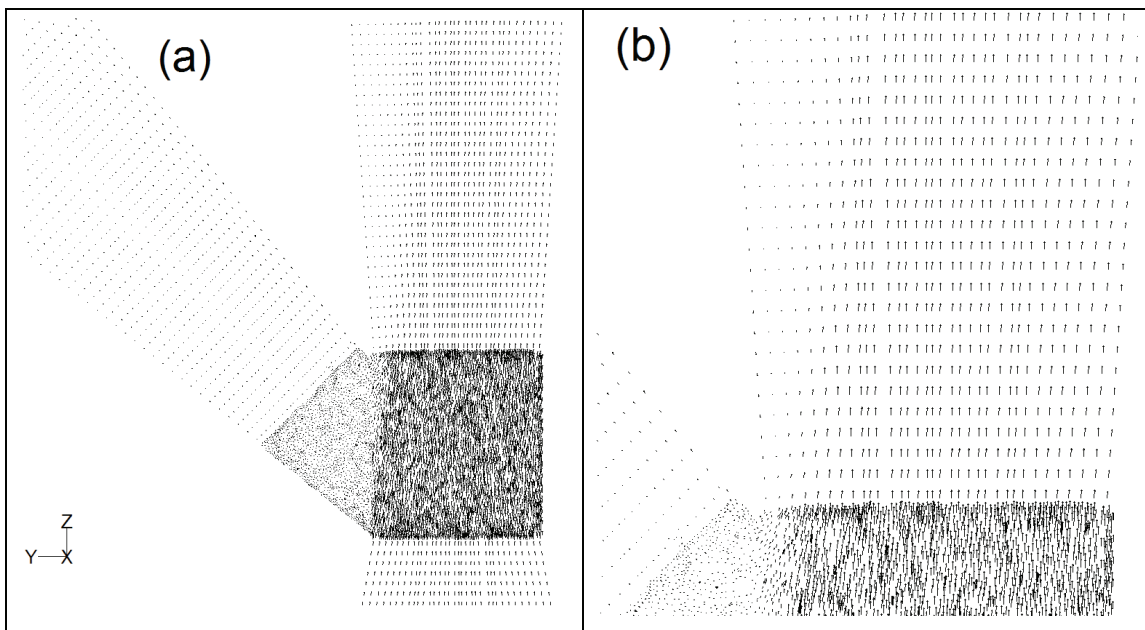


Figura 4.10 – Campo vetorial de velocidade para a superfície S_y do escoamento de ar no alimentador Venturi. b – foco na saída do alimentador.

As velocidades maiores estão deslocadas para o lado oposto da lateral (Figura 4.10) indicando visualmente a perturbação gerada no perfil de velocidades do ar pela adição da lateral (conduto de alimentação) na geometria de um dispositivo Venturi comum.

Além disso, a lateral provoca um desvio do campo vetorial na direção

contrária ao conduto de alimentação e gera uma região de recirculação de baixa velocidade do mesmo lado que o conduto.

A Figura 4.11 indica que o perfil de velocidades em z para o dispositivo de alimentação (com lateral) é distorcido do perfil simétrico obtido a partir da simulação bidimensional do dispositivo Venturi.

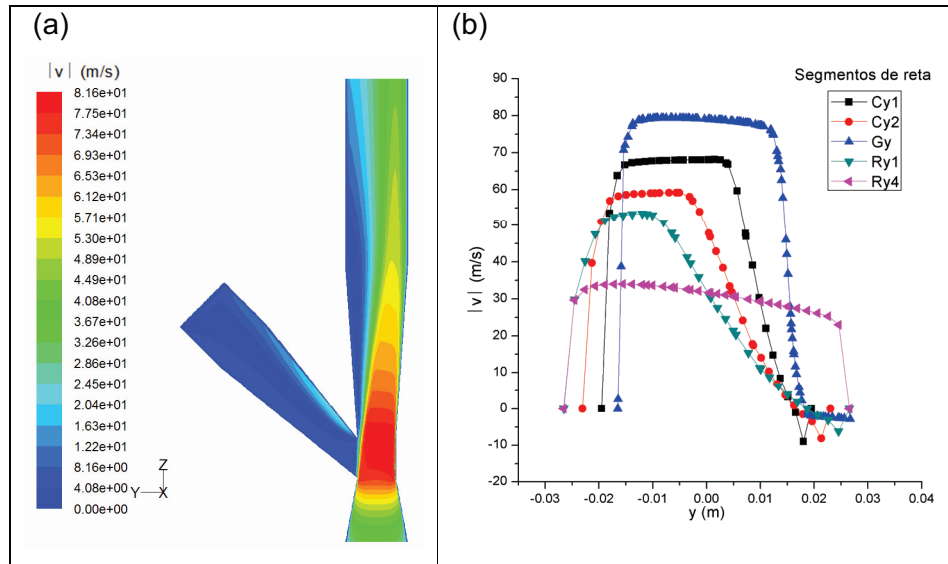


Figura 4.11 – Resultados da simulação para a velocidade em z. a - campo escalar v_z . b - v_z em função de y (direção secundária) para diversas posições em z na superfície S_y .

A energia cinética turbulenta era ampliada à jusante do alimentador Venturi como pode ser observado na Figura 4.12, região essa coincidente à de recirculação da Figura 4.10.

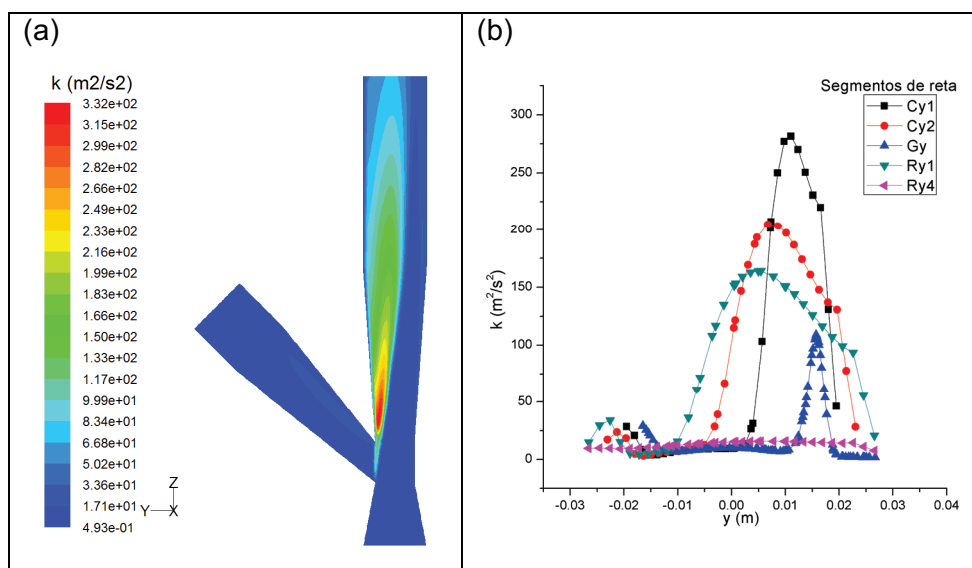


Figura 4.12 – Resultados da simulação para a energia cinética turbulenta. a - campos escalares. b - energia cinética turbulenta em função de y para diversas posições em z na superfície S_y .

A Figura 4.13 apresenta o perfil de perda de pressão para simulação 2D e 3D.

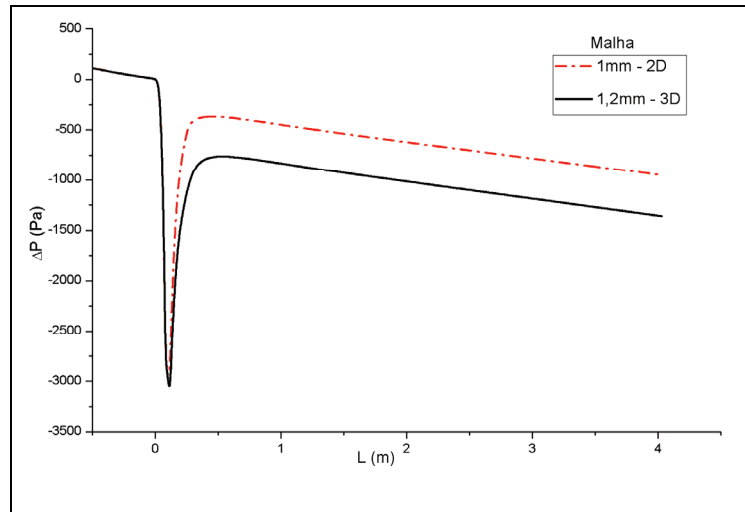


Figura 4.13 – Perda de pressão em função de L para o *trecho ascendente* obtida em simulação bidimensional e tridimensional do alimentador Venturi.

A queda de pressão da simulação do alimentador Venturi (simulação 3D) foi consideravelmente maior do que a do dispositivo Venturi (simulação 2D). Este resultado é relevante para demonstrar o impacto do conduto lateral na perda de pressão do sistema, uma vez que ensaios não foram realizados com dispositivo Venturi nas mesmas dimensões daquelas do alimentador (Figura 3.4).

4.2.2 Verificação da estabilidade da malha

A aproximação de segunda ordem para a energia cinética turbulenta da fase fluída (k_f) será justificada ao final dessa seção. Portanto, até que se diga o contrário, as simulações do escoamento monofásico foram realizadas com aproximação de primeira ordem para o termo conectivo na equação de transporte da energia cinética turbulenta.

A Figura 4.14 mostra a comparação entre os resultados para perda de pressão (referente à t_1) das simulações 2D do *trecho ascendente* com o dispositivo Venturi (sem a lateral) em diferentes refinamentos da malha.

Como não havia lateral para alimentação de sólidos, a hipótese de

simetria axial era rigorosamente válida neste caso e por enquanto somente simulações bidimensionais serão apresentadas.

Os pontos dos nós, que forneceram os dados para a perda de pressão nos gráficos, foram omitidos e manteve-se somente a ligação direta dos valores de pressão em cada nó (por uma reta). Neste caso não há problema na omissão, exatamente pela grande quantidade de pontos obtidos axialmente nas simulações.

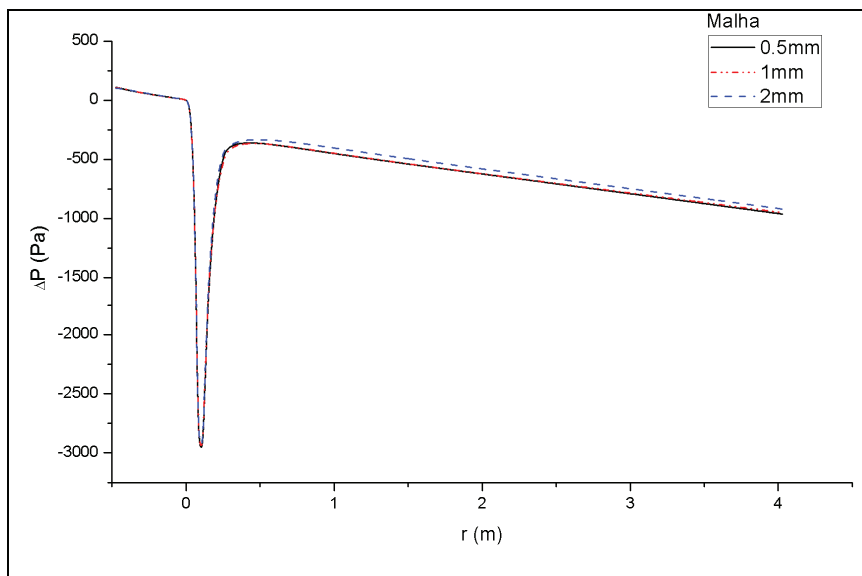


Figura 4.14 – Perda de pressão em função de L para o *trecho ascendente* obtida a partir de simulação bidimensional de um dispositivo Venturi com mesmas dimensões do alimentador em estudo com diferentes refinamentos de malha.

Observe que a malha com base em 2mm apresentou resposta quantitativamente diferente das demais, mas ainda assim as soluções são muito próximas.

Também vale observar que a maior distinção é provocada pelo trecho do próprio dispositivo Venturi, o que já era esperado devido à sua complexidade geométrica.

A maior complexidade geométrica costuma provocar maiores gradientes nas variáveis de estado (de velocidade, por exemplo). Portanto, espera-se que a região seja a mais difícil de ser representada pela solução numérica.

A Figura 4.15 confirma a distinção descrita ao mostrar a pressão no eixo de simetria da simulação bidimensional do Venturi para a região próxima à garganta (ampliação da Figura 4.14).

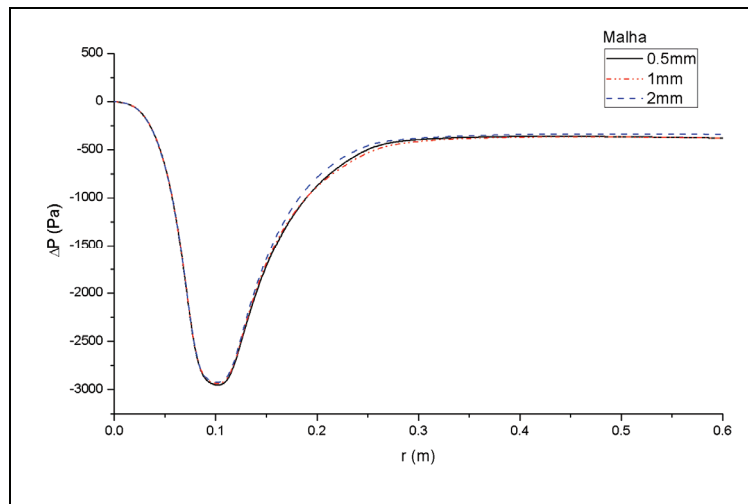


Figura 4.15 - Perda de pressão em função de L obtida em simulação 2D com diferentes refinamentos de malha para o *trecho ascendente - foco no trecho do dispositivo Venturi*.

É possível notar com mais clareza as distinções das soluções fornecidas pelas malhas na Figura 4.16, que apresenta os perfis radiais de velocidade (módulo da velocidade) para diferentes refinamentos de malha e em duas alturas diferentes.

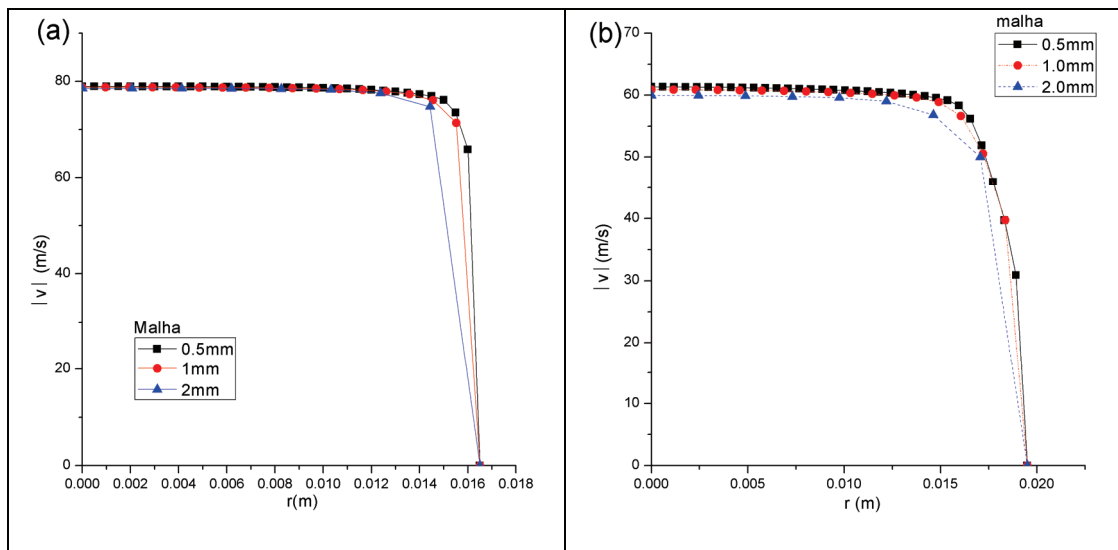


Figura 4.16 – Módulo da velocidade do ar em função da posição radial para escoando em *trecho ascendente* com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D. a – perfis no segmento de reta Gy. b – perfis no segmento de reta Cy1.

Vale ressaltar que em todo o comprimento do sistema a velocidade radial é bem menor que a axial. Deste modo, o módulo da velocidade reflete

principalmente o que ocorre na direção principal do escoamento.

Os segmentos de reta utilizados para apresentação dos resultados na Figura 4.16 foram escolhidos porque a tendência é que erros adicionados aos perfis no escoamento através do Venturi diminuam à medida que se distancie do dispositivo em questão.

Além disso, a região da garganta do Venturi (e da saída cônica do Venturi) é muito importante quando há alimentação de sólidos no sistema, caso que será exposto adiante com a simulação do alimentador Venturi.

Observa-se que o modelo com a malha 1mm apresentou resposta muito similar ao modelo com a malha de 0,5mm, representando razoavelmente o obtido com a malha mais fina, mesmo quantitativamente.

A linha que liga os pontos não faz parte do modelo computacional, sendo adotada somente para apresentação gráfica dos dados. Assim, a malha de 2mm apresentou desvios quantitativos pouco maiores, mas ainda representava bem o escoamento da malha mais refinada.

Os perfis de energia cinética turbulenta são apresentados na Figura 4.17.

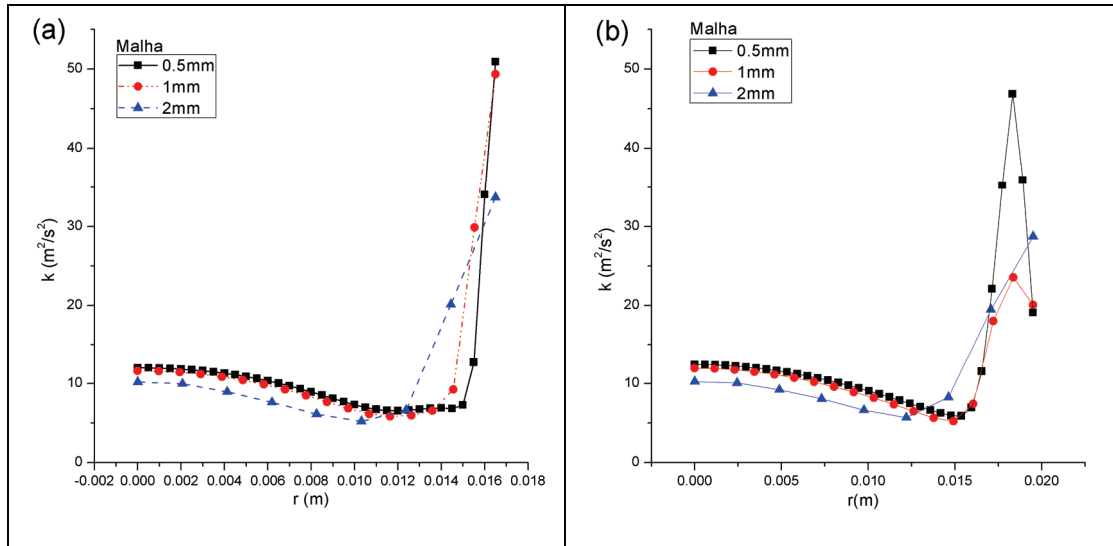


Figura 4.17 - Energia cinética turbulenta em função da posição radial para escoamento do ar em *trecho ascendente* com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D. a – perfis no segmento de reta Gy. b – perfis no segmento de reta Cy1.

Observa-se distinção maior da malha com 2mm do que foi encontrado para o módulo da velocidade (Figura 4.17). A distinção chega a ser qualitativa para o seguimento de reta Cy1.

Além disso, a malha com base em 1mm na garganta apresentou distinções quantitativas no seguimento de reta Cy1 dos resultados da malha mais refinada. Entretanto, já no segmento de reta Cy2 a malha com base em 1mm apresentou resultados melhores e mais comparáveis à malha com 0,5mm, como indica a Figura 4.18.

A Figura 4.18 também mostra que a energia cinética turbulenta foi mal representada pela malha construída com base em 2mm.

A partir dos perfis de pressão, velocidade e energia cinética turbulenta sabe-se que a malha com base em 2mm não é uma escolha adequada para as simulações bidimensionais do Venturi analisado.

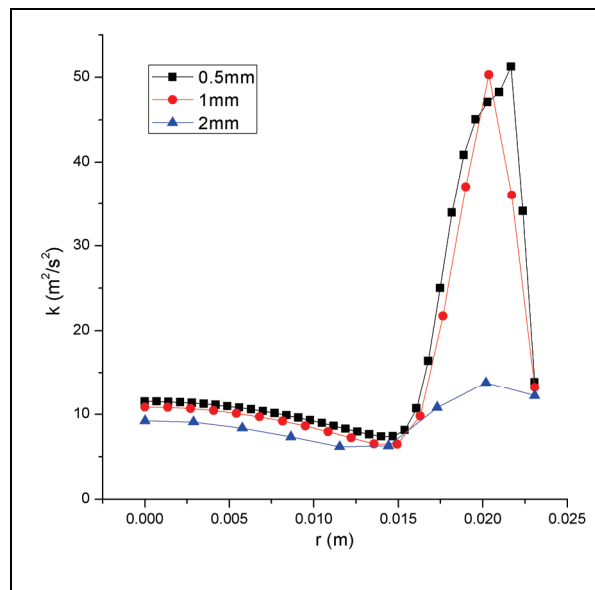


Figura 4.18 - Energia cinética turbulenta em função da posição radial no segmento de reta Cy2 para o escoamento do ar em *trecho ascendente* com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 2D.

Apesar dos resultados apresentados até agora, não é possível concluir muito sobre as malhas tridimensionais a partir dos refinamentos de malhas bidimensionais, pois a presença da lateral torna necessária à utilização de topologia diferente para malha na região de junção dos condutos (a construção da malha foi descrita na seção 3.2.1).

Portanto, a seguir serão apresentados resultados para diversos refinamentos de malha na geometria do Venturi em simulações tridimensionais do escoamento, utilizando a mesma construção de malha da geometria do alimentador Venturi (com lateral), ou seja, malha tetraédrica na garganta.

Espera-se com isto apresentar as influências da malha tetraédrica na

solução do escoamento de ar por comparações com a simulação 2D e também os efeitos do refinamento da malha tetraédrica na garganta por comparações de soluções em diversos refinamentos para perfis importantes de variáveis no sistema.

A Figura 4.19 mostra a perda de pressão no eixo do trecho ascendente em função da direção principal de escoamento nas simulações 3D para diferentes refinamentos de malha e da 2D com malha construída com base em 1mm na garganta.

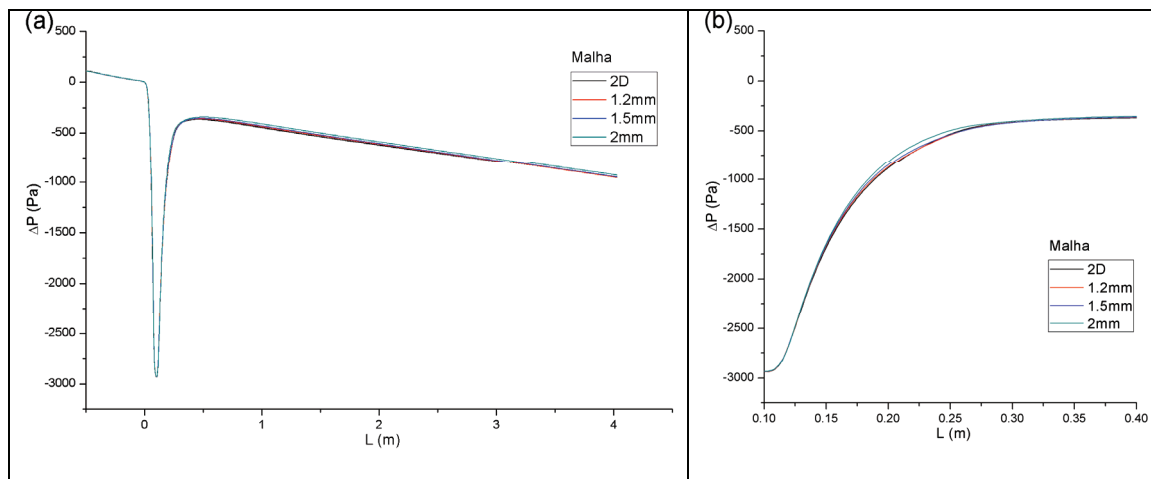


Figura 4.19 – Perda de pressão no eixo central em função de L para simulação 3D de um dispositivo Venturi (sem lateral) em *trecho ascendente*. Apresentação de diversos refinamentos de malha e comparação com a solução da simulação 2D com malha de 1mm. b – apresenta aproximação maior para região próxima a garganta.

Os perfis de perda de pressão obtidos das simulações apresentaram grande proximidade entre si, mostrando concordância entre as diversas malhas utilizadas (Figura 4.19).

A Figura 4.19.b mostra que desvios pouco maiores são obtidos próximo à região da garganta do Venturi, o que já era esperado como explicado para as simulações bidimensionais (Figura 4.14, por exemplo), pois esta é a região mais complexa do escoamento.

A Figura 4.20 apresenta perfis de velocidade (módulo da velocidade) obtidos de simulações tridimensionais com diferentes refinamentos de malha para o dispositivo Venturi em trecho ascendente.

Os resultados na Figura 4.20 são apresentados somente para valores positivos de y e comparados com a simulação bidimensional (malha de 1mm), resolvida em r (coordenadas cilíndricas). A proximidade entre as curvas para y

negativo são muito similares devido à simetria do sistema e a apresentação do perfil todo se tornou desnecessária.

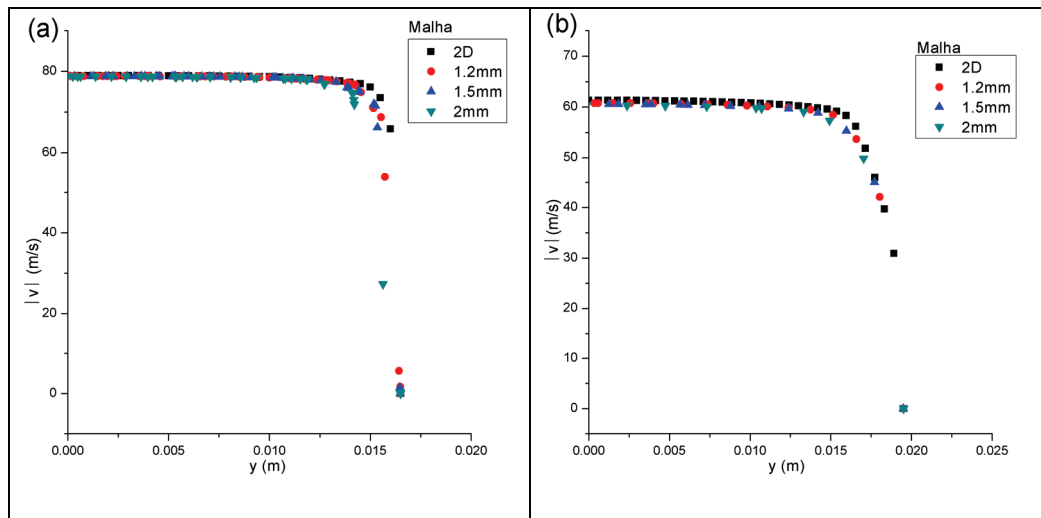


Figura 4.20 - Módulo da velocidade do ar em função da coordenada y para o escoamento em *trecho ascendente* com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações tridimensionais e da simulação 2D com malha de 1mm. a – perfis no segmento de reta Gy. b – perfis no segmento de reta Cy1.

A Figura 4.21 traz as mesmas comparações, mas para perfis da energia cinética turbulenta (k).

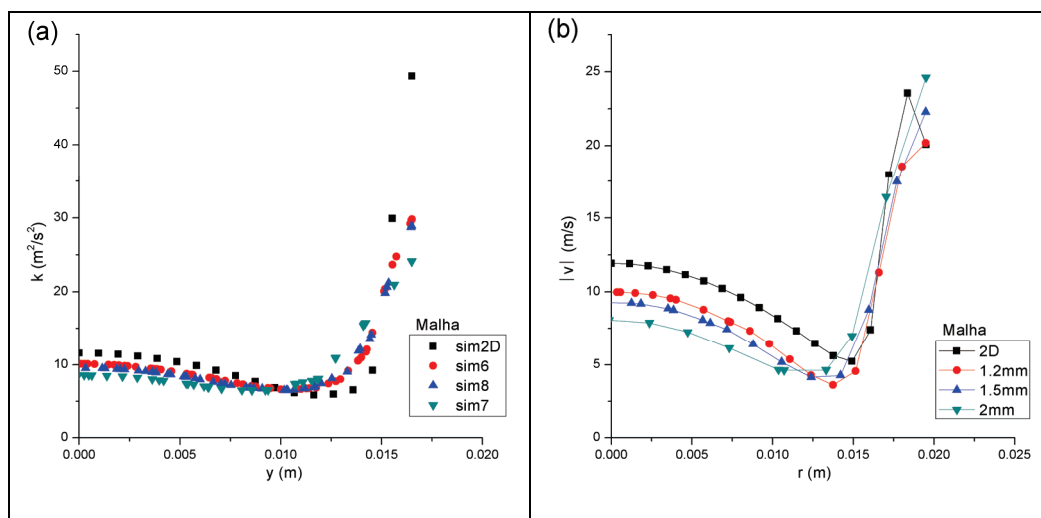


Figura 4.21 - Energia cinética turbulenta em função da coordenada y para o escoamento do ar em *trecho ascendente* com dispositivo Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulação 3D e da simulação 2D com malha de 1mm. a – perfis no segmento de reta Gy. B – perfis no segmento de reta Cy1

A Figura 4.20 e a Figura 4.21 mostram que a solução numérica é próxima, mas a malha com base em 2mm apresenta desvios pouco maiores, principalmente na garganta do Venturi. Além disso, os resultados de aproximação das soluções são corroborados pela solução bidimensional.

A maior proximidade entre si dos perfis obtidos a partir das malhas 3D em relação àquela obtida nas 2D possivelmente se deve à diferença na construção da malha. Mais especificamente, a malha tetraédrica construída com certa subdivisão da malha na garganta fornece mais células na região de junção dos condutos do que a mesma divisão forneceria bidimensionalmente.

Deste modo, apesar das simulações bidimensionais do escoamento de ar em Venturi com malha construída com base em 2mm ser inadequada, as simulações 3D com malha 2mm não o são.

Por fim, serão apresentados adiante os resultados obtidos em simulações tridimensionais do *trecho ascendente* com o alimentador Venturi da Figura 3.4.

A solução do escoamento monofásico fornece campos de partida para a solução gás-sólido e fornece noções sobre o efeito da geometria no escoamento do ar (discutida na seção 4.2.1).

A Figura 4.22 mostra a perda de pressão em função do comprimento percorrido no leito para simulações tridimensionais com diversas malhas.

A simulação com malha construída com base em 0,6mm foi realizada para trecho ascendente mais curto somente para reduzir o tempo computacional, o que não deve influir nas discussões, já que a região com maiores erros é aquela próxima à junção dos condutos.

Observa-se grande proximidade entre as simulações com malhas de 0,6 e 1,2mm. Entretanto, a malha de 2mm apresentou diferença considerável, apesar da mesma diferença não ter sido observada na simulação tridimensional do dispositivo sem a lateral. Atribui-se tal diferença ao aumento da complexidade geométrica dado pela inclusão da lateral.

Observe que a diferença ocorre principalmente na região próxima a junção de condutos, pois a região distante assume perfil linear de queda de pressão e as retas possuem coeficientes angulares muito próximos (são praticamente paralelas). Como já foi dito (caso da simulação do escoamento de ar no Venturi), isso era esperado porque essa é a região mais complexa do ponto de vista geométrico.

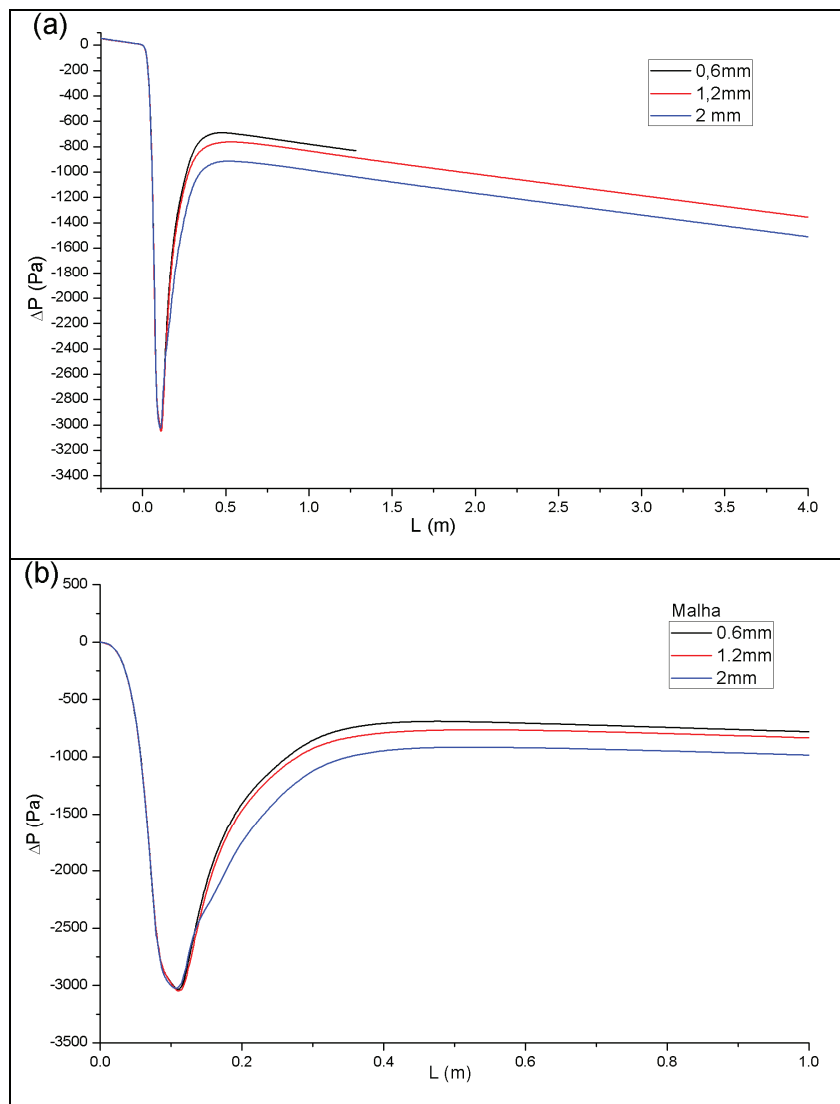


Figura 4.22 - Perda de pressão no eixo central em função de L para a simulação 3D do alimentador Venturi em *trecho ascendente*. Apresentação de diversos refinamentos de malha. b – apresenta aproximação maior para região próxima à garganta.

A Figura 4.23 apresenta perfis de velocidade para as simulações tridimensionais do escoamento de ar com alimentador de sólidos. Todas as malhas apresentadas obtiveram desempenho semelhante com relação à velocidade.

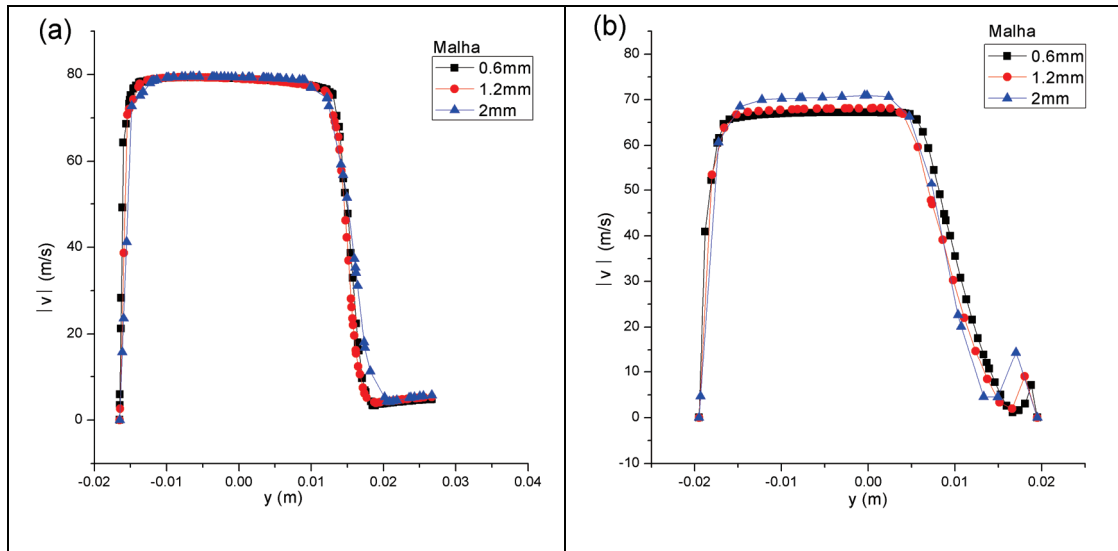


Figura 4.23 - Módulo da velocidade do ar em função da coordenada y para o escoamento em *trecho ascendente* com alimentador Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulações 3D. a – perfis no segmento de reta Gy. b – perfis no segmento de reta Cy1.

A Figura 4.24 apresenta os perfis de energia cinética turbulenta para as mesmas alturas da Figura 4.23.

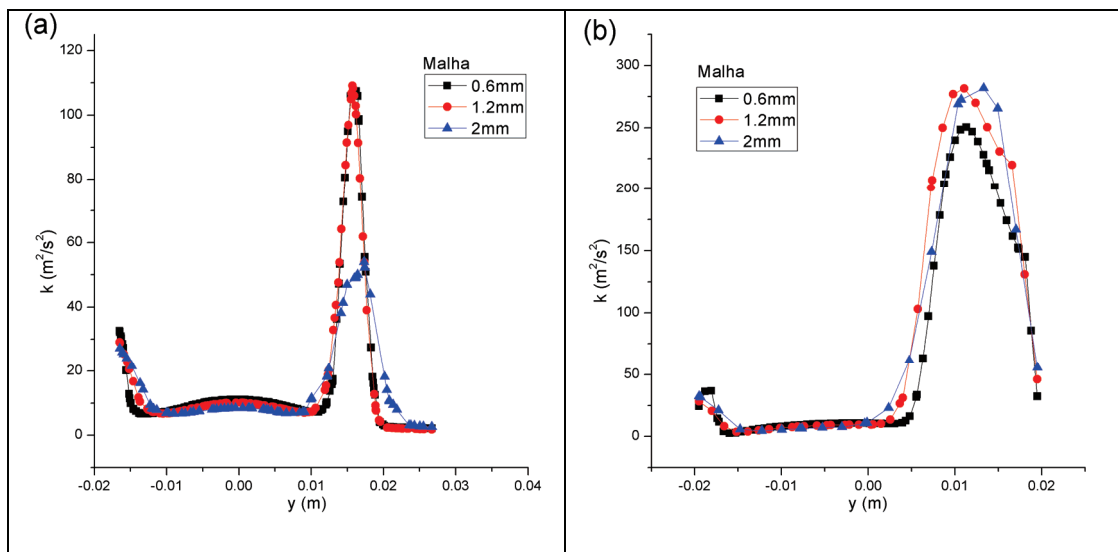


Figura 4.24 - Energia cinética turbulenta em função da coordenada y para o escoamento do ar em *trecho ascendente* com alimentador Venturi para diferentes refinamentos de malha em simulação 3D. a – perfis no segmento de reta Gy. B – perfis no segmento de reta Cy1.

A partir da Figura 4.24 vemos que os perfis de energia cinética turbulenta das malhas mais refinadas para o segmento Gy não são quantitativamente representados pela malha de 2mm.

No entanto, também se observa que os perfis se aproximam já no segmento Cy1.

A partir das diferenças dos perfis da Figura 4.24 na garganta é possível questionar se a aproximação de segunda ordem para k não poderia ser utilizada para melhorar o desempenho da malha mais grosseira.

A Figura 4.25 apresenta a comparação dos perfis de pressão obtidos de simulações utilizando as duas aproximações para energia cinética turbulenta.

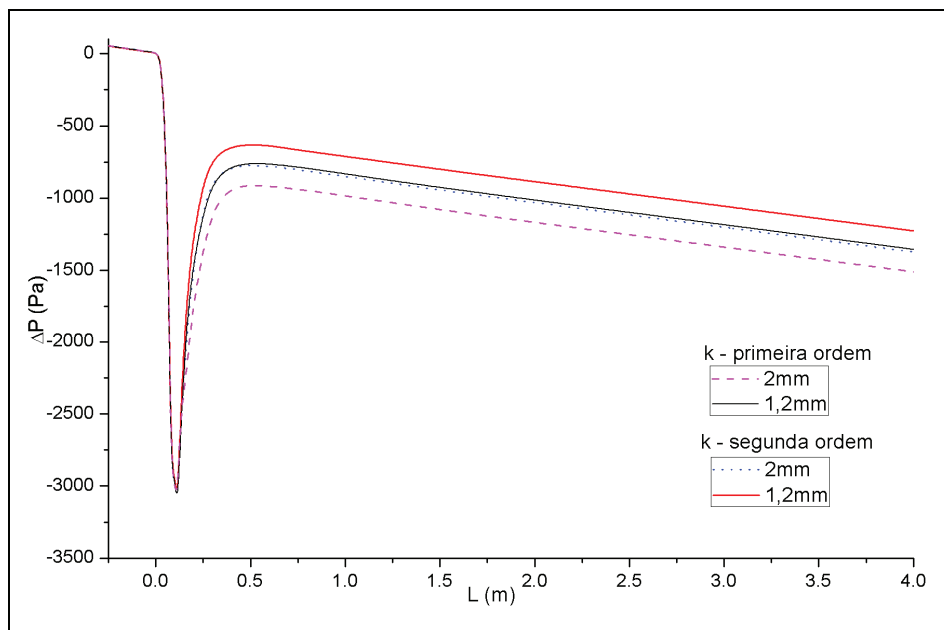


Figura 4.25 - Perda de pressão no eixo central em função de L para a simulação 3D do alimentador Venturi em *trecho ascendente* para diferentes aproximações do termo convectivo para k . Apresentação das malhas baseadas em 2mm e 1,2mm.

Observa-se que houve alteração considerável na queda de pressão para o alimentador Venturi quando a aproximação numérica para o termo convectivo foi alterada tanto na malha de 2mm como na de 1,2mm. Portanto, a aproximação de segunda ordem para k_f foi utilizada para as simulações do escoamento bifásico.

A seção 4.2.3 mostra que a utilização da aproximação de segunda ordem para k levou à aproximação dos dados de pressão das simulações do escoamento monofásico aos resultados experimentais.

4.2.3 Simulação tridimensional do escoamento de ar: comparação com resultados experimentais

A Figura 4.26 apresenta a comparação entre a perda de pressão (referente à t_1) em função de L obtida para as simulações do escoamento de ar no sistema e os dados experimentais para ensaios sem sólidos.

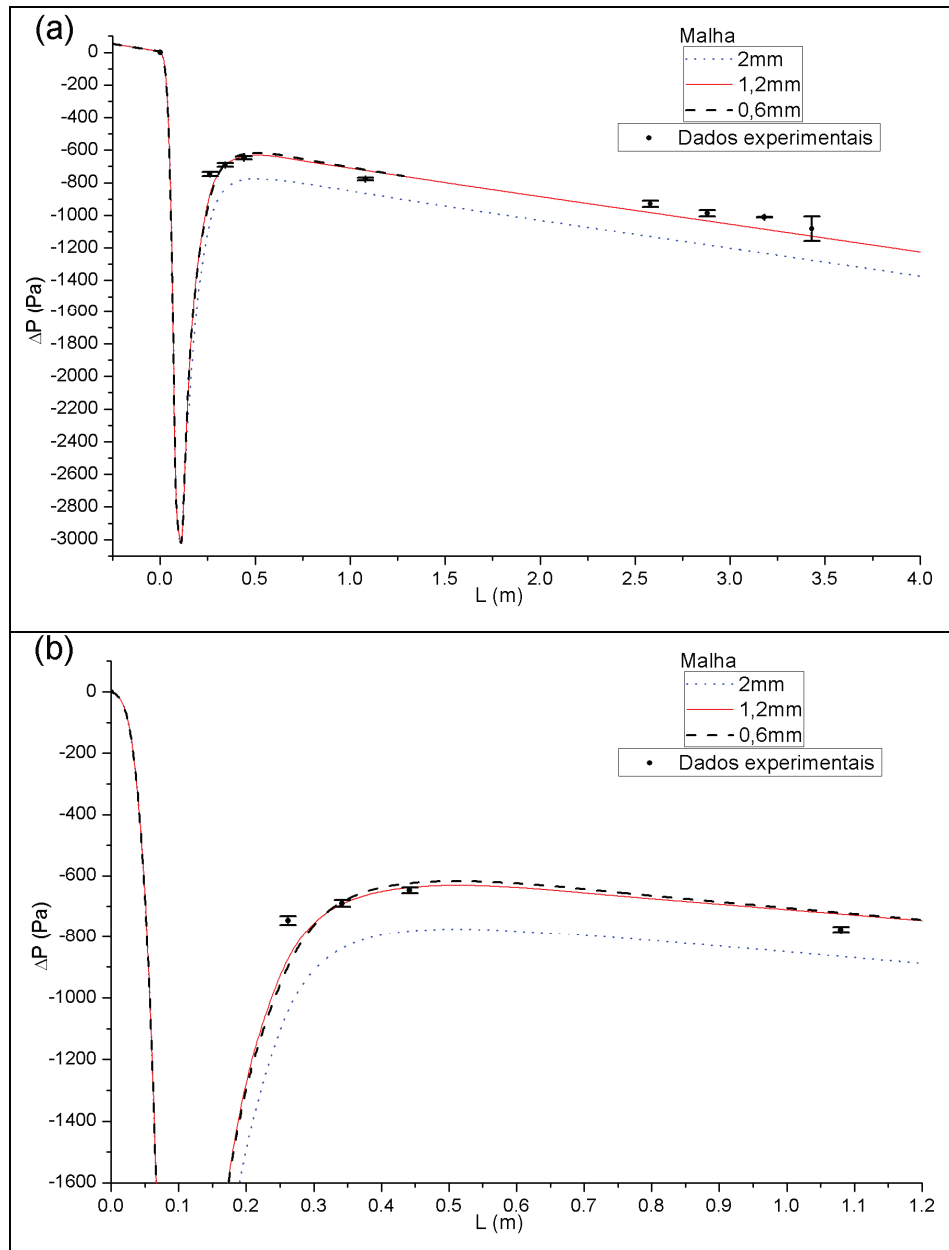


Figura 4.26 – Perda de pressão em função de L . Resultados da solução para o eixo central com diversos refinamentos de malha da simulação 3D com aproximação de segunda ordem para k e dados experimentais. a – todo trecho ascendente simulado. b – maior enfoque na região próxima à alimentação.

A Figura 4.27 apresenta a comparação entre os dados experimentais e os resultados das simulações com aproximação de primeira ordem para k .

Observa-se que a utilização da aproximação de segunda ordem foi indispensável para melhorar a verificação experimental das simulações pela comparação direta da Figura 4.27 com a Figura 4.26.

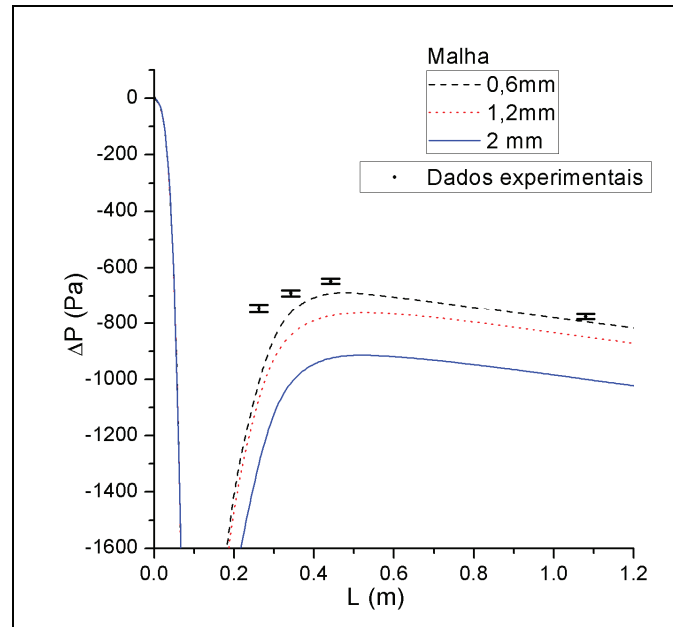


Figura 4.27 – Perda de pressão em função de L para simulações utilizando aproximação de primeira ordem para k em diversos refinamentos de malha e dados experimentais.

A Figura 4.26-b compara as simulações e os dados experimentais para região mais próxima da garganta. Neste caso, é possível notar como os erros de tendência concentram-se na região do alimentador quando se utiliza a malha mais grosseira. Na região do alimentador os erros são maiores devido à complexidade do escoamento, causada pela geometria mais complexa e consequentemente com a presença de maiores gradientes de velocidade.

Os maiores desvios sistemáticos observados na Figura 4.26 quando próximo à alimentação ficaram em torno de 280 Pascal ao se compara os dados experimentais com a simulação de malha 2mm (na localização de t2). Apesar disso, este desvio já era reduzidos para cerca de 140Pa em t3.

As malhas mais refinadas apresentaram erros de no máximo 130Pa (na localização de t2).

Tendo em vista que a origem principal dos desvios observados para malha grosseira era na alimentação e uma vez que o trecho ascendente pode ser dividido entre região de alimentação e região linear para pressão, a

comparação da estimativa de perda de pressão por comprimento na região linear para os dados experimentais e aquela obtida pela simulação forneceu comparação para qualificar a previsão da perda de pressão neste trecho.

A estimativa de perda de pressão por comprimento a partir da simulação com malha de 1,2mm forneceu 172Pa/m, enquanto a estimativa por dados experimentais forneceu $131,0 \pm 7,9$ (intervalo de confiança para 95%, Tabela 4.3). As simulações para malhas de 2 e 0,6mm apresentaram perdas de carga de 174 e 194 Pa/m, respectivamente.

Deste modo, desvios sistemáticos foram observados na perda de pressão por comprimento na região linear quando comparadas as simulações com os resultados experimentais. No entanto, ressalta-se que os desvios não foram elevados. Vale lembrar que o desvio de 41 Pa/m, obtido da simulação com malha 1,2mm para a média experimental, corresponde a pouco mais de 4mm de coluna de água para cada metro.

Outra questão a se levantar é que os modelos utilizados tem aspectos fenomenológicos marcantes, não havendo qualquer ajuste experimental de parâmetros com base nos dados experimentais obtidos na tese.

Deste modo, as estimativas apresentaram grande concordância com os dados experimentais tanto na região próxima à alimentação como na região linear para pressão.

A malha com base em 1,2mm passou a ser mais interessante para obtenção de simulações porque o refinamento da malha de 1,2mm para 0,6mm não apresentou melhora de tendência em relação aos dados experimentais e indicou aumento do erro numérico ao comparar a queda de pressão na região linear.

A simulação com malha de 2mm de refinamento apresentou desvios sistemáticos (Figura 4.26) na região do dispositivo de alimentação. Além disso, desvios maiores foram obtidos em relação às demais malhas na comparação de perfis radiais mais relevantes (seção 4.2.2). Entretanto, é necessário cautela ao considerá-la inviável para simular o sistema de transporte em estudo.

Primeiro, a malha representou qualitativamente os resultados das malhas mais refinadas e com tempo computacional bem inferior. Segundo, a malha construída com base em 1,2mm apresentou tempo computacional proibitivo na simulação do escoamento bifásico para todo trecho ascendente de interesse

(3,75m).

A malha de 2mm apresentava tempo computacional apropriado para obter-se a simulação do escoamento gás-sólido em todo o comprimento do trecho ascendente experimental.

Simulações com malha de 2mm para o trecho vertical em todo o seu comprimento foram realizadas por estas razões. Como a malha de 2mm já apresentava desempenho inferior, verificou-se as características fluidodinâmicas relevantes desta solução, como a formação e agrupamentos de sólidos e a região de desvio do gás na alimentação, através de soluções com malhas mais refinadas para trechos verticais mais curtos (1,2 e 1,5mm).

Deste modo, as simulações tridimensionais do escoamento bifásico foram realizadas nos refinamentos de 1,2mm, 1,5mm e 2mm.

4.3 Simulações 2D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com geometrias características da alimentação de partículas.

You et al. (2009) realizaram simulações bidimensionais do escoamento multifásico em geometrias características de diversos alimentadores em um *trecho ascendente*. A partir delas este trabalho obteve o perfil radial para escoamento em uma secção distante da alimentação, em que o escoamento foi considerado desenvolvido.

You et al. (2009) verificaram os perfis de fração de sólidos desenvolvidos com dados de *Du et al. (2004)*. O desenvolvimento do escoamento foi considerado pleno também por critério introduzido por *Du et al. (2004)*.

You et al. (2009) analisaram então o impacto do alimentador no desenvolvimento do escoamento da fase sólida e utilizaram as respostas das simulações para analisar o desenvolvimento do escoamento.

A complexidade dos fenômenos envolvidos e a ausência de dados experimentais impossibilitam a generalização direta dos resultados de *You et al. (2009)* e *Du et al. (2004)* para as condições do presente trabalho (baixa pressão, alimentador Venturi para baixas pressões e particulado grosseiro, etc).

No entanto, a análise das soluções bidimensionais ao longo do trecho ascendente poderia indicar a independência do escoamento em relação à

alimentação a partir de um comprimento de desenvolvimento.

Um dos aspectos mais importantes seria a estabilização da estrutura de escoamento (padrão do perfil radial de fração de sólidos) a partir de certo comprimento do trecho vertical. Esta característica seria evidência da dissolução de estruturas formadas a partir do escoamento na alimentação, como, por exemplo, agrupamentos de sólidos.

A partir daí haveria expectativa em se obter soluções independentes da geometria da alimentação e que poderiam vir a representar características fluidodinâmicas do escoamento gás-sólido em alimentadores cuja inserção de partículas fosse assimétrica. Como é o caso para maioria dos alimentadores utilizados para leito fluidizado circulante (seção 2.2.1 e 2.2.3), incluindo o dispositivo de interesse do presente trabalho (Figura 3.4).

Simulações bidimensionais foram realizadas durante o doutorado seguindo esta estratégia para simular o escoamento multifásico nas condições de interesse em questão.

Esta seção apresenta resultados e discussões acerca das simulações bidimensionais em duas geometrias características: com afunilamento (modelo para alimentador Venturi) e sem restrição (modelo para sistema sem alimentador ou com alimentação a partir de válvulas com aeração externa).

Utilizou-se em todas as simulações a condição de vazão de sólidos obtida experimentalmente durante a operação do leito fluidizado circulante (descrições na seção 4.1.3) com alimentador de sólidos do tipo Venturi (Figura 3.4) em orientação vertical para 29,5m/s de velocidade média do ar (3.9m³/min de vazão de ar). O que forneceu 29.6Kg/h para vazão de sólidos.

Ressalta-se que de modo algum se esperava obter representação razoável do escoamento na região próxima da alimentação. Somente havia expectativa em que seria possível inferir a fluidodinâmica da fase sólida para o *trecho ascendente* experimental e também trecho ascendente mais longos a partir do desaparecimento das influências da alimentação.

Infelizmente a estratégia mostrou-se ineficiente, pois estruturas formadas na alimentação não desapareceram ao longo do escoamento no *trecho vertical* e simulações tridimensionais foram necessárias. A seção 4.4 traz resultados e discussões sobre as simulações 3D.

4.3.1 Resultados de perda de pressão e verificação experimental

A Figura 4.28 apresenta os resultados de perda de pressão (em relação à pressão em t1 no eixo do sistema) em função da posição axial para as simulações 2D realizadas.

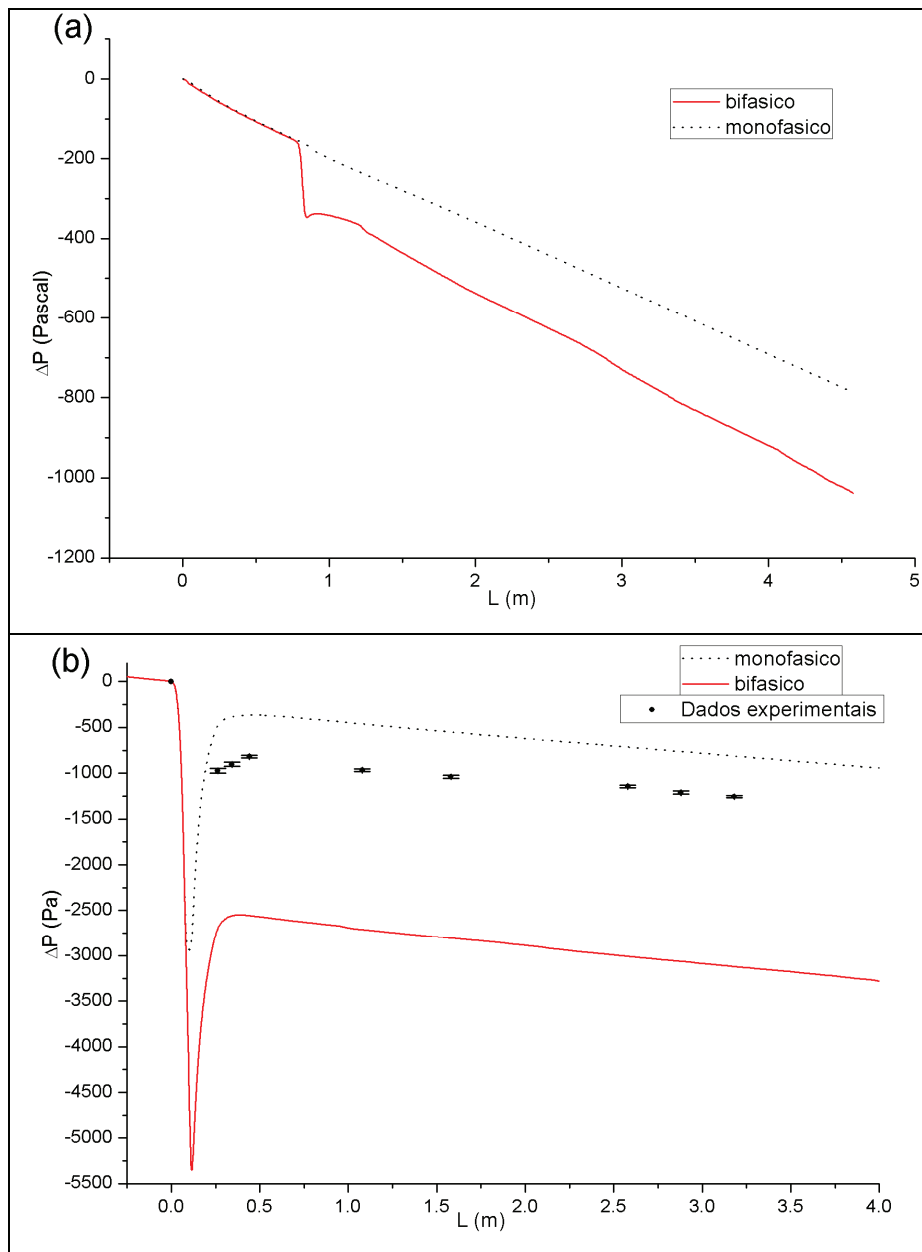


Figura 4.28 - Perda de pressão em função de L no *trecho ascendente* das simulações 2D do escoamento bifásico e dados experimentais. a – caso sem restrição. b – caso com restrição. A figura mostra também os resultados de queda de pressão para simulações de escoamento monofásico de ar em dispositivo Venturi (sem lateral).

A Figura 4.28-b também apresenta os dados experimentais de pressão

obtidos em ensaios com o leito fluidizado circulante (seção 4.1) operando com alimentador Venturi (da Figura 3.4).

Ao comparar as simulações na ausência e presença de sólidos (Figura 4.28), é possível visualizar o grande impacto da região de alimentação sobre a queda de pressão local (consequentemente também sobre a queda de pressão total) quando na presença da injeção de sólidos.

Esta influência é conhecida na literatura e associada à grande transferência de momento entre as fases para esse trecho do transportador.

Embora o impacto da injeção de sólidos local seja grande, observa-se que a perda de pressão em função do comprimento percorrido aproxima-se à uma reta para regiões distantes da alimentação. Além disso, os coeficientes angulares para simulações com e sem sólidos foram próximos: -169Pa/m para solução monofásica e -199Pa/m para a bifásica com coeficiente de especularidade nulo. A especularidade 0,2 fornecia perdas de carga em torno de -208 Pa/m na região linear.

O fato dos coeficientes angulares serem próximos é uma consequência do sistema diluído de transporte pneumático, em que a presença de sólidos afeta muito superficialmente o escoamento do ar para regiões distantes da alimentação.

A simulação bidimensional do escoamento multifásico em trecho ascendente com alimentador Venturi apresentou perda de pressão muito díspare dos dados experimentais (Figura 4.28-b).

A razão para essa disparidade é explicada pela grande diferença entre a fluidodinâmica da simulação para a região de alimentação da fase sólida e aquela obtida experimentalmente. No entanto, isto já era esperado, como foi mencionado anteriormente, visto que a simetria axial não é válida para o alimentador Venturi da Figura 3.4.

No entanto, isto não significa que as diferenças fluidodinâmicas dadas pela simetria axial não possam ser amenizadas, ou mesmo eliminadas, ao longo do escoamento. Para tanto, são necessárias descrições sobre a fluidodinâmica do escoamento dos sólidos. Tais descrições e discussões pertinentes foram apresentadas na seção 4.3.2.

4.3.2 Fluidodinâmica das simulações 2D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente

A Figura 4.29 mostra os campos escalares para fração de sólidos das simulações 2D com coeficiente de especularidade nulo.

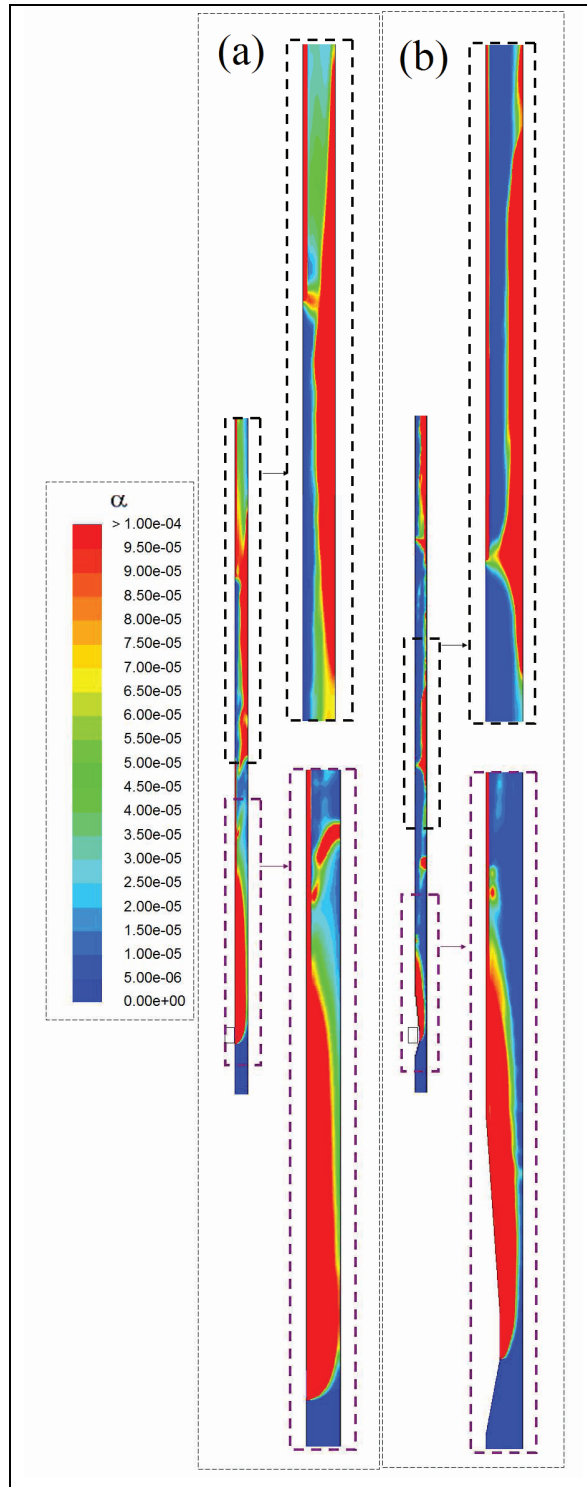


Figura 4.29 - Campos escalares para a fração de sólido das simulações 2D – eixo de simetria à direita e alimentação à esquerda. a – caso sem restrição. b – caso com restrição.

A Figura 4.29 apresenta somente os campos escalares em torno do eixo de simetria (para qualquer ângulo de rotação). Durante todo o trabalho os campos para simulações bidimensionais escalares foram apresentados deste modo, como já é usual quando a hipótese de simetria axial é adotada (*Bird et al., 2004*).

Ambas as simulações (Figura 4.29) apresentaram estrutura de escoamento similar, tanto próximo da alimentação, como em maiores distâncias da alimentação.

A estrutura observada foi a centro-anular-parede de modo similar ao observado por *Du et al. (2004)* para particulado fino em certas condições experimentais. Entretanto, a região concentrada na parede mostrou-se instável ao longo do escoamento. Assim, a estrutura centro-anular-parede alternava-se com a estrutura centro(concentrado)-anular(diluído).

Além disso, o escoamento encontrado para fase sólida ocorria em pulsos, alternando regiões mais concentradas e diluídas no sistema à medida que se observava o escoamento ao caminhar na direção axial em um instante de tempo fixo.

Esta estrutura em pulsos lembra as observações de bolhas feitas por *Du et al. (2004)* na região concentrada central, mas para o caso das simulações deste trabalho as descontinuidades de zonas mais concentradas tomavam todo o diâmetro da tubulação.

Não foi possível obter grande resolução para a observação dos campos escalares de fração de sólidos devido à grande diluição encontrada em quase todo o sistema, exceto bem próximo à injeção de sólidos. Esta é a razão pela qual as regiões em vermelho intenso da Figura 4.29 são também para valores maiores que 10^{-4} (não apenas entre $9,5 \cdot 10^{-5}$ e 10^{-4}).

A Figura 4.30 apresenta os gráficos para fração de sólidos em função da posição radial em diferentes alturas do transportador (distâncias da alimentação).

Os perfis apresentados na Figura 4.30 mostram dados para fração de sólidos obtidos na extensão de todo o pulso que percolava o sistema. A posição a 2,28 metros da alimentação foi tomada como referência para as demais distâncias (negativas para distâncias menores e positivas para as maiores que

a referência).

A altura de referência é a distância da referência adotada a partir da alimentação. As referências foram adotadas em cada gráfico com o objetivo de somente incluir nos gráficos perfis que facilitassem a observação do comportamento do escoamento da fase sólida.

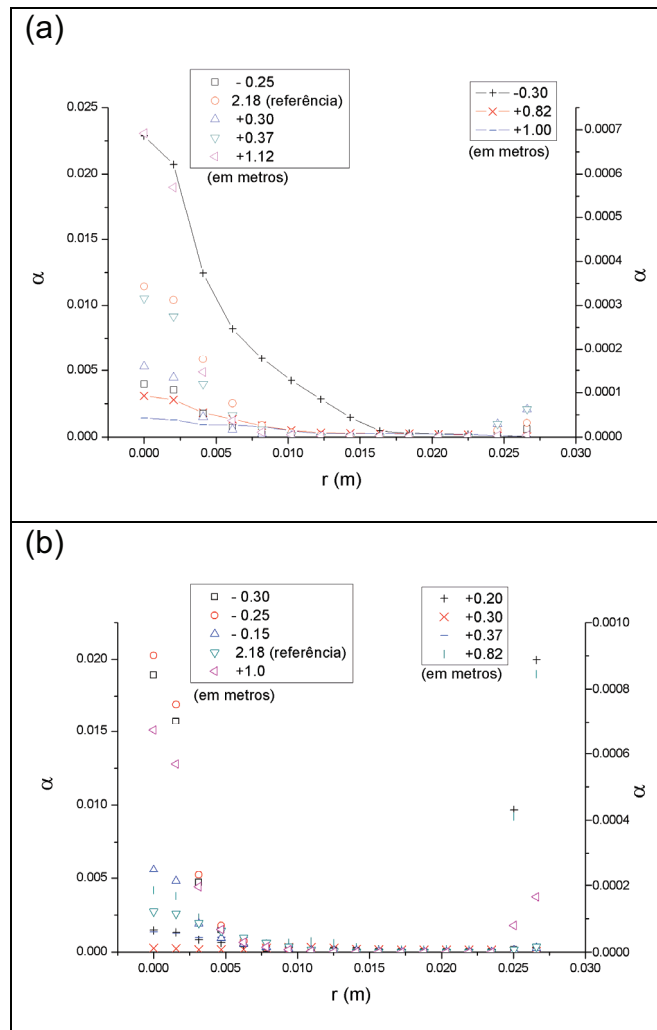


Figura 4.30 - Fração de sólidos em função da posição radial em diferentes distâncias da alimentação. a – caso sem afunilamento. b – caso com afunilamento. Coeficiente de especularidade nulo.

A partir da Figura 4.30 é possível perceber claramente a tendência da estrutura do escoamento em se alternar entre centro-anular-parede e centro-anular.

Ressalta-se que as diferenças de fração de sólidos são muito pequenas, indo de nulas a até no máximo a ordem de grandeza de 0,01 em regiões mais densas.

A variação do coeficiente de especularidade para 0,2 indicou que a estrutura do escoamento próxima à alimentação não era sensível à esse parâmetro, como indica a Figura 4.31.

Entretanto, o aumento do coeficiente de especularidade indicou que a zona concentrada, próxima à parede torna-se mais estável à medida que esse parâmetro é aumentado, uma vez que menos descontinuidades foram observadas para esse anel ao longo do escoamento com coeficiente de especularidade maior.

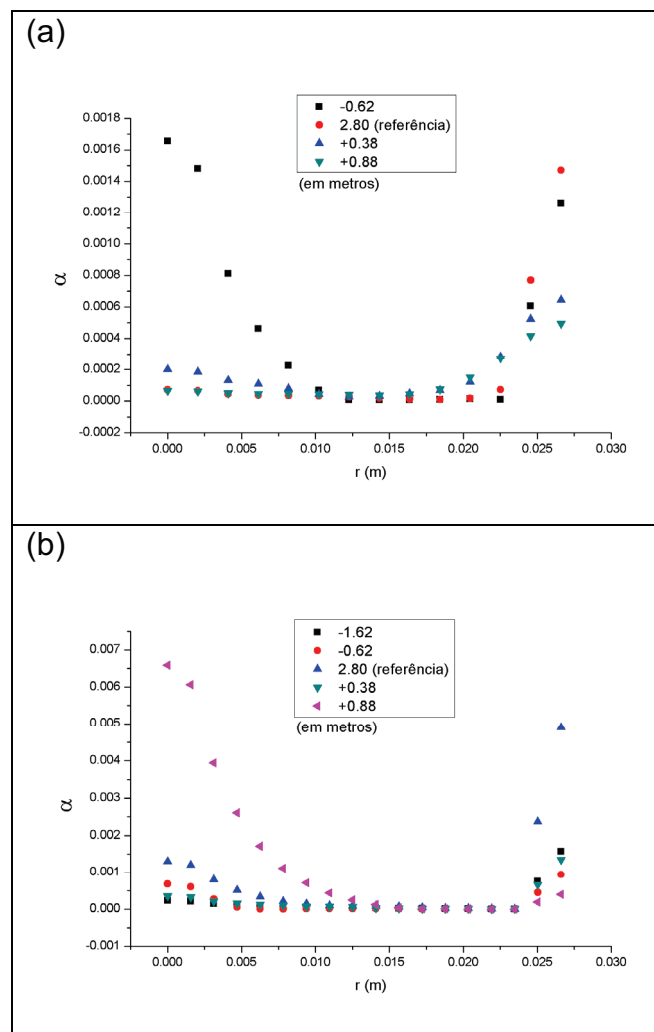


Figura 4.31 - Fração de sólidos em função da posição radial para diferentes distâncias da alimentação. a – caso sem afunilamento. b – caso com afunilamento. Coeficiente de especularidade 0,2.

A Figura 4.32 apresenta o campo escalar da fração de sólidos em região próxima à alimentação para diversos tempos de simulação (tempo real de processo).

A partir da Figura 4.32 é possível concluir que a estrutura em pulsos, ou seja, com grandes discontinuidades nas regiões densas da estrutura de escoamento, se originava na região de alimentação dos sólidos.

O início da formação dessas “bolhas” ocorria nas regiões próximas às paredes. Com o passar do tempo o centro do tubo também alimentava o processo de formação da bolha com ar diluído e o avanço temporal fazia com que a bolha tomasse toda a extensão do tubo.

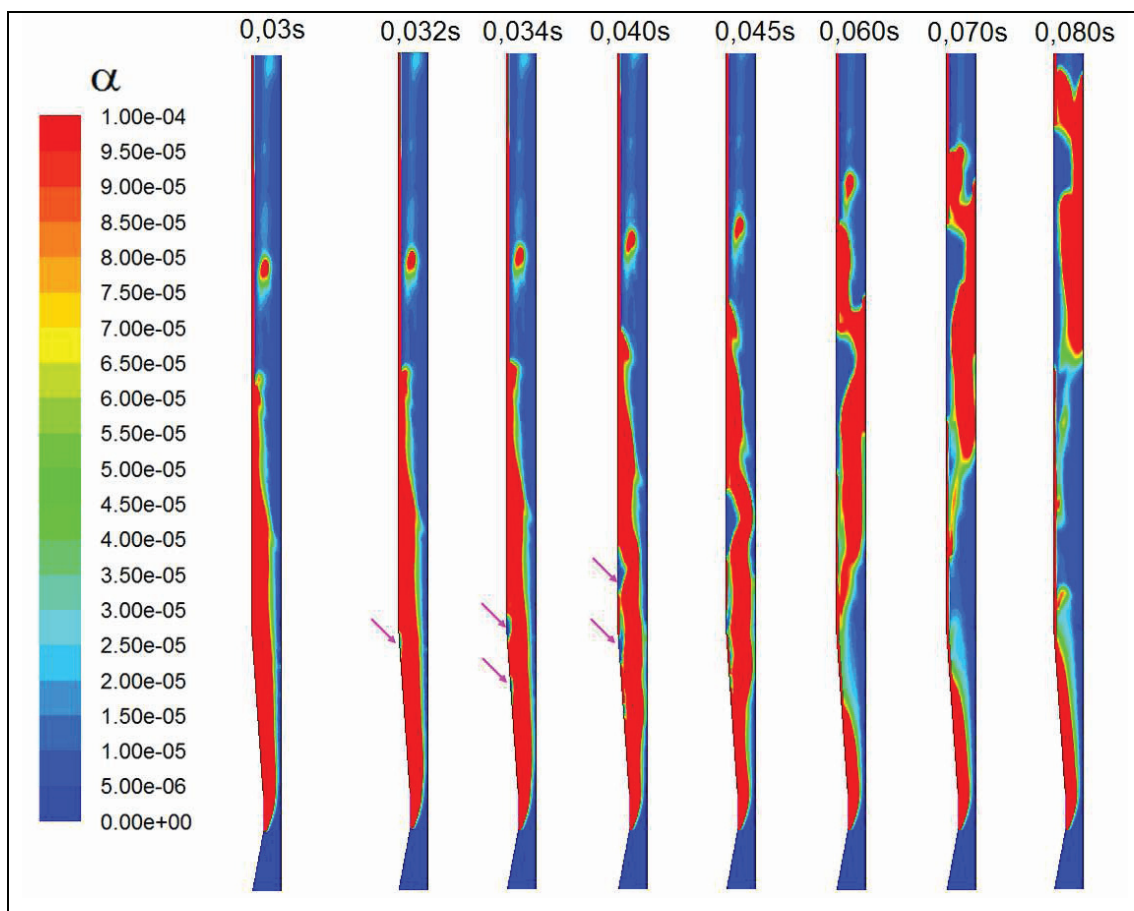


Figura 4.32 - Desenvolvimento das bolhas no sistema a partir da alimentação de sólidos com restrição para a simulação 2D até 0,45m de comprimento do trecho ascendente. Coeficiente de especularidade nulo. Legendas na parte superior indicam evolução temporal a partir da imagem à esquerda. Referência dos instantes de tempo em 9s.

Resultados similares a Figura 4.32 foram encontrados para o caso sem restrição e casos com coeficiente de especularidade 0,2.

Apesar das simulações mostrarem claramente a estrutura em bolhas (descontinuidades da região mais concentrada central); se de fato presente, essa variação de concentração de sólidos é tão pequena que a mensuração

experimental destas variações seria difícil (Zhu et al., 2003; Du et al. 2004) e não foram encontrados dados quantitativamente mensurados na literatura.

4.4 Simulações 3D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com alimentador Venturi para baixas pressões.

Diante das seguintes constatações:

- a simetria axial das solução 2D para o alimentador Venturi (da Figura 3.4) não é válida para região próxima à alimentação devido à assimetria geométrica existente;
- a seção 4.3.2 mostra que as estruturas macroscópicas, como agrupamentos de sólidos (pulsos), geradas a partir da região próxima a inserção da fase sólida no sistema não se dissiparam ao longo do escoamento para as simulações bidimensionais;

pode-se inferir que a solução 2D para o escoamento gás-sólido não pode fornecer dados e conclusões sobre a fluidodinâmica da operação do leito circulante com o alimentador Venturi em *trecho ascendente* no comprimento de interesse (da Figura 3.1).

Deste modo, somente simulações tridimensionais podem ser utilizadas para analisar o escoamento até o comprimento simulado em 2D. Comprimento este que corresponde ao sistema experimental de interesse.

Além disso, as simulações 2D indicaram que, apesar de todas as ressalvas com relação às possíveis imprecisões das hipóteses utilizadas no modelo e erros numéricos, para as condições operacionais utilizadas neste trabalho pode-se obter perturbações geradas na alimentação (como agrupamentos de sólidos e grandes bolhas) que se propaguem até comprimentos relativamente longos do sistema (ao menos 10 vezes a ordem de grandeza do comprimento do alimentador Venturi).

A propagação das perturbações da alimentação até comprimentos consideráveis difere muito do que já foi encontrado para escoamento gás-sólido de particulado fino (como tratam Wilde et al, 2005; Cheng et al, 1998) para diâmetros relativamente reduzidos de tubulação.

A observação de efeitos da alimentação de sólidos grosseiros em

comprimentos mais longos condiz com a noção intuitiva dada pela inércia da partícula utilizada (elevado diâmetro de partícula). Afinal, a fase sólida possui nestes casos inércia muito maior do que no caso do particulado fino e assim é muito menos orientada pelo escoamento do ar.

A Figura 4.33 apresenta os resultados das simulações 3D do escoamento gás-sólido com coeficiente de especularidade 0,2 e nulo para pressão axial em função da direção principal do escoamento (comprimento percorrido). Somente dados para malha de 2mm foram apresentados na figura.

Os dados da Figura 4.33 foram obtidos com 9 segundos de escoamento simulado. Testes de sensibilidade com relação ao tempo de amostragem na simulação foram realizados para malha de 2mm entre 8 e 18 segundos.

Os testes mostraram que as diferenças poderiam ser desprezadas o que permitiu a apresentação de um único perfil de pressão.

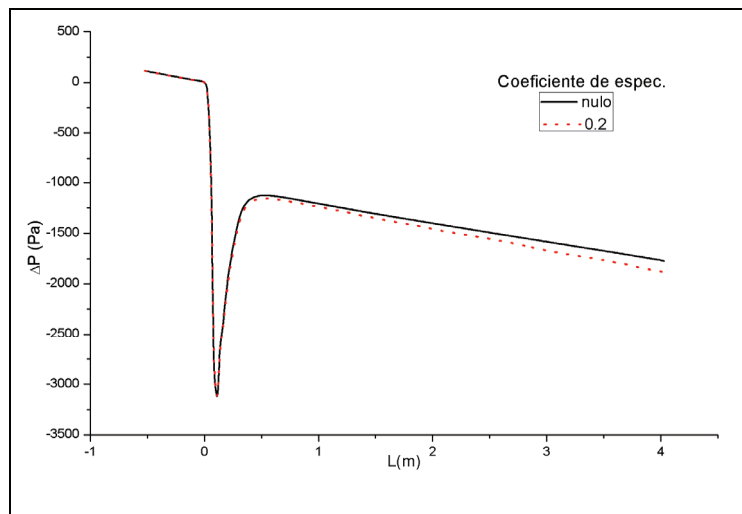


Figura 4.33 – Perda de pressão da simulação para o escoamento gás-sólido no eixo do trecho ascendente com alimentador Venturi de simulação 3D. Casos com coeficientes de especularidade diferentes.

A partir da Figura 4.33, nota-se visualmente a diferença no coeficiente angular da reta na região linear da pressão em função de L. Esta diferença era dada pelos efeitos do contorno de parede na fluidodinâmica da fase sólida.

O detalhamento em relação à fluidodinâmica do sistema foi apresentado somente para o coeficiente especular que apresentou melhor aproximação da perda de pressão na região linear quando comparado aos resultados experimentais. A seção seguinte mostra que o coeficiente nulo foi selecionado e apresenta demais dados para verificação experimental.

4.4.1 Verificação experimental.

A Figura 4.34 apresenta as soluções tridimensionais do escoamento gás sólido (com coeficiente de especularidade nulo) para pressão axial em função da direção principal do escoamento.

Os dados de pressão das simulações foram apresentados com diferentes refinamentos de malha. Também estão no gráfico as medidas experimentais dos ensaios com sólidos (apresentados na seção 4.1.3).

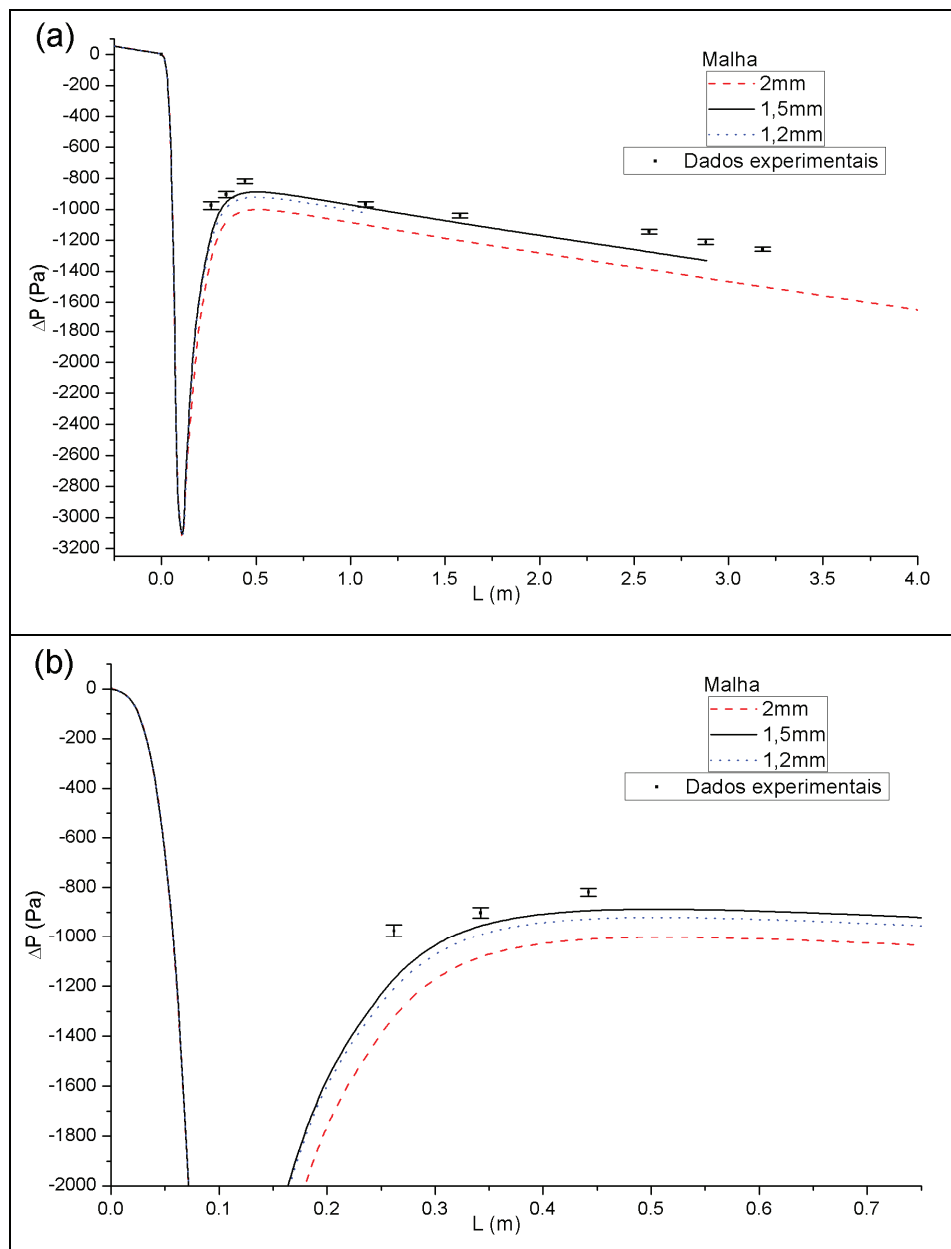


Figura 4.34 - Perda de pressão experimental e das simulações com diversos refinamentos de malha do escoamento gás-sólido no eixo do sistema simulado em 3D com alimentador Venturi. b – apresenta enfoque maior na região próxima à alimentação.

Os dados experimentais foram qualitativamente representados pelas simulações. Entretanto, houve desvios sistemáticos originados principalmente da fluidodinâmica na região próxima a alimentação (pressão não linear no comprimento).

Observa-se que a simulação com malha de 2mm apresentou maiores desvios em relação aos dados experimentais. No entanto, os desvios sistemáticos apresentados estão próximos aos já apresentados na simulação monofásica com a mesma malha.

Deste modo, a malha não foi excluída da análise fluidodinâmica da fase sólida. Ao invés disso utilizou-se malhas mais refinadas procurando verificar quais aspectos fluidodinâmicos já eram obtidos com a malha mais grossa.

Embora os desvios sistemáticos tenham se reduzido com o refinamento da malha (Figura 4.34) para 1,5mm, isto não ocorreu com o refinamento seguinte (1,2mm).

Deste modo, o refinamento da malha não estaria mais levando à diminuição dos desvios em relação aos dados experimentais nas simulações do escoamento multifásico.

A fonte da variação do perfil de pressão para malha baseada em 1,2mm pode ser o modelo físico utilizado, a definição de um transportador relativamente curto, ou a ampliação dos erros numéricos de arredondamento devido ao refinamento. Entretanto, as hipóteses não puderam ser testadas porque a utilização de maior refinamento da malha ou de trecho vertical mais longo para malha de 1,2mm inviabilizaria a simulação para a estrutura computacional utilizada (Apêndice C).

As estimativas de perda de pressão das simulações na região linear foram obtidas pelos coeficientes angulares das retas ao considerar o ajuste linear dos pontos de pressão em função do comprimento percorrido da distância correspondente à t_4 até o final do trecho vertical (região linear apresentada na seção 4.1.2 e 4.1.3).

A estimativa de perda de pressão na região linear foram -181Pa/m para o coeficiente nulo e -209Pa/m para o valor de 0,2. Os dados experimentais forneceram estimativa de $-149,4 \pm 8,8$ (intervalo de confiança para 95% de confiança da Tabela 4.6).

As simulações, portanto, superestimaram a perda de pressão para essa região. Deste modo também, está justificada a escolha do coeficiente de especularidade nulo para apresentação detalhada da fluidodinâmica.

Os desvios entre as simulações da Figura 4.34 na perda de pressão para a região próxima à alimentação foram bem menos marcantes do que os obtidos na Figura 4.28. A proximidade pode ser explicada pela maior similaridade da fluidodinâmica na região quando a simulação 3D é utilizada. Isto já era esperado devido à invalidade da simetria axial na região de alimentação.

Além dos desvios na alimentação, também a estimativa de perda de pressão na região linear para pressão foi melhor na simulação 3D com coeficiente de especularidade nulo do que a obtida nas simulações com simetria axial para o mesmo coeficiente. Este é um indício à favor da similaridade fluidodinâmica da simulação 3D com o escoamento real.

Apesar dos desvios mencionados, é razoável supor que muitos aspectos da fluidodinâmica do escoamento multifásico no sistema estejam sendo representados nas simulações.

Afinal, além de representar bem qualitativamente os resultados dos experimentos, as soluções também estão relativamente próximas dos dados. Principalmente ao se constatar que o modelo utilizado não possui qualquer vínculo direto com os resultados experimentais, como, por exemplo, ajuste de parâmetros a partir do aparato experimental utilizado.

Além disso, a simplicidade fornecida pela suposição de escoamento diluído dá maior valor ao modelo aplicado neste doutorado. Por exemplo, o uso do modelo completo (fase por fase) para turbulência ao invés do modelo para escoamento diluído implicaria maior tempo computacional e instabilidade numérica ampliada.

Tendo estas observações em mente, a análise detalhada da fluidodinâmica do sistema foi apresentada nas seções 4.4.2.

4.4.2 Fluidodinâmica das simulações 3D do escoamento gás-sólido em trecho ascendente com alimentador Venturi

A Figura 4.35 apresenta os campos escalares da fração de sólidos para o escoamento multifásico na superfície S_y para a região próxima à alimentação de partículas ao longo do tempo de escoamento (referencial de partida corresponde à 9 segundo da simulação).

Observe que há baixa resolução no campo escalar devido à grande diluição dos sólidos no sistema assim como nas simulações bidimensionais.

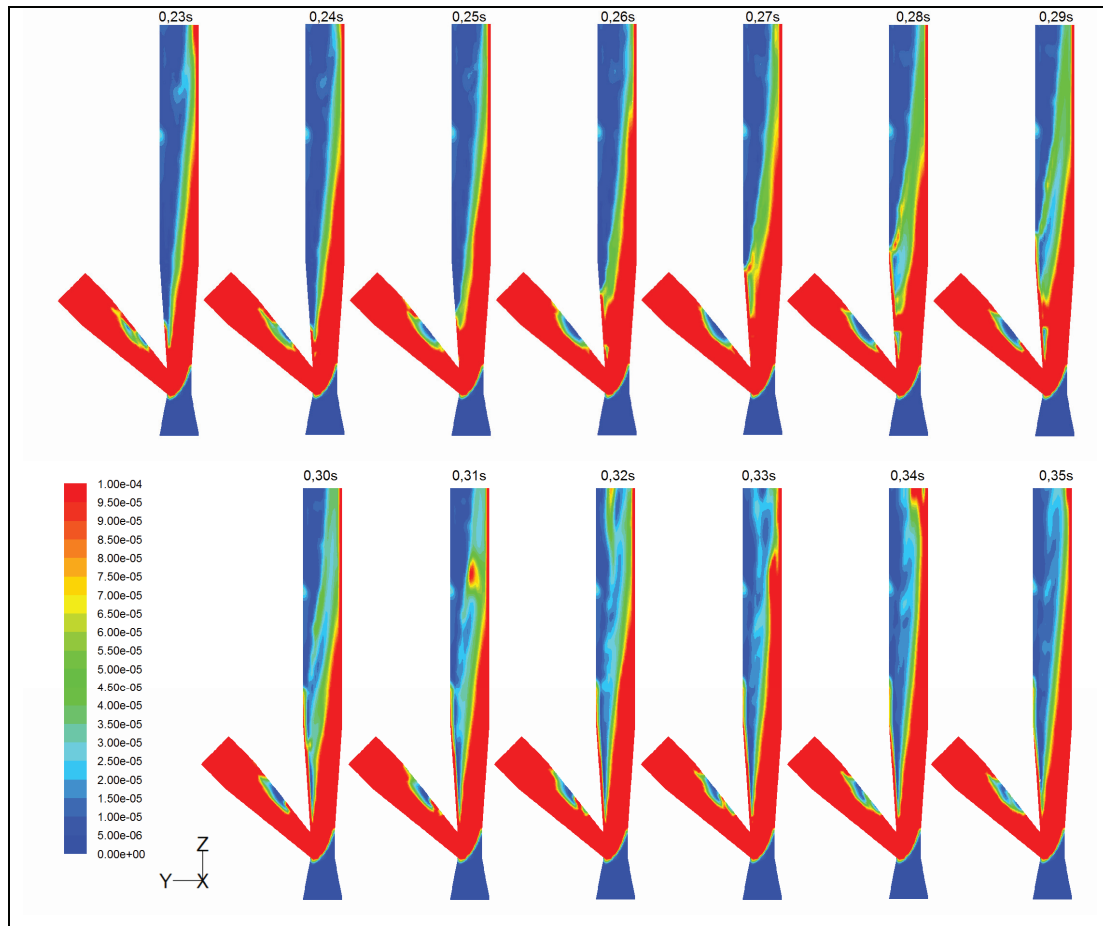


Figura 4.35 – Campos escalares da fração de sólidos ao longo do tempo para a superfície S_y até 0,3m de altura do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

Os sólidos tendem a estar concentrados do lado oposto ao conduto de alimentação. Em outras palavras, a região de desvio dos sólidos pelo ar no sistema ocorria do mesmo lado do conduto lateral (Figura 4.35).

A Figura 4.35 indica que os padrões de escoamento em diferentes instantes de tempo eram similares, mas não idênticos, pois ocorreu aumento na concentração de sólidos em regiões mais diluídas (entre 0,26 e 0,28s).

O aumento mencionado ocorre periodicamente uma vez que pode ser

observado várias vezes entre 9 e 15 segundos do escoamento.

A região densa do lado do conduto de alimentação (direção positiva de y) na Figura 4.35 é formada por agrupamentos que não são transportados. Neste caso, a região densa é expandida ao longo do cone de saída do alimentador para depois retornar na direção contrária ao escoamento de ar. Esta é a única região em que se observou a fase sólida seguindo em sentido contrário ao escoamento de ar.

A Figura 4.36 apresenta o campo escalar da fração de sólidos para a superfície Sz-C1 ao longo do tempo.

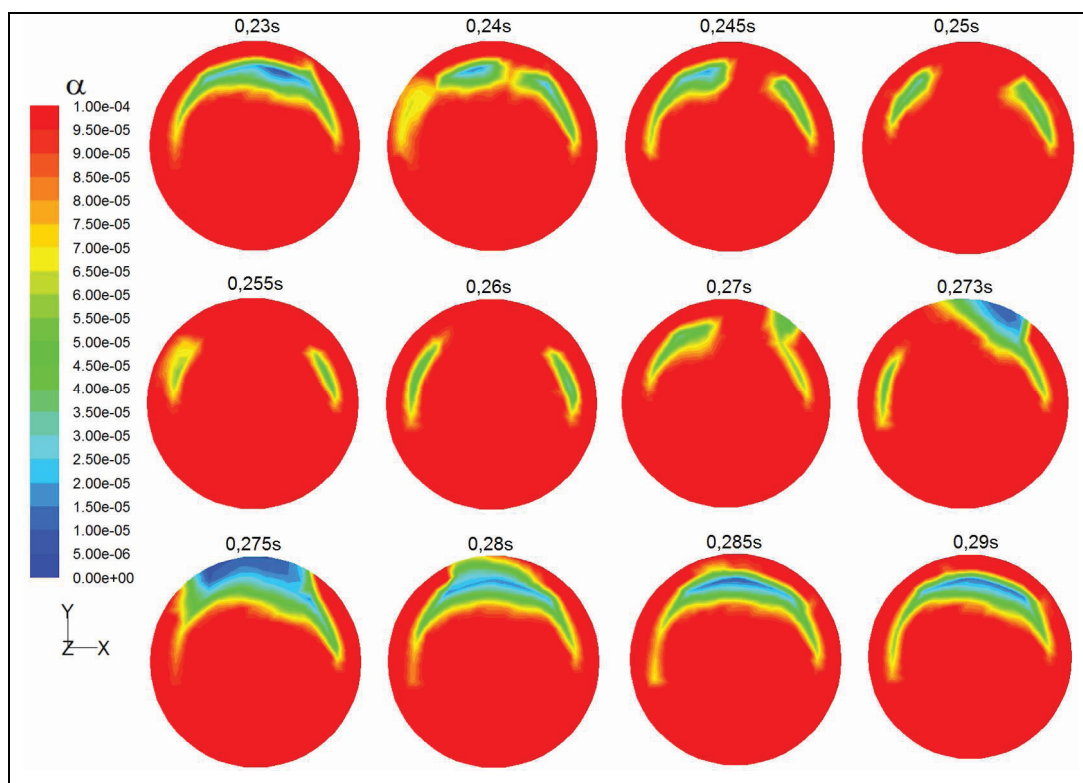


Figura 4.36 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.36 mostra que na maior parte do tempo existe densidade maior de sólidos do lado do conduto de alimentação e próximo à parede (sentido positivo de y). Assim, a região diluída (de desvio) da superfície Sz-C1 tendia a manter-se em forma de lua crescente.

A parte densa observada na direção y (lado do conduto de alimentação) corresponde aos agrupamentos que não são transportados na direção principal do escoamento (Figura 4.36), como já havia sido mencionado para a Figura

4.35.

Este adensamento forma um anel denso do lado do cone em que os sólidos foram alimentados. Vale destacar que esse anel não permanece continuamente no sistema (0,273 a 0,28s da Figura 4.36).

Em 0,24s observa-se o início da perturbação na estrutura diluída antes observada, que tem então sua concentração de sólidos aumentada nos instantes seguintes.

O campo escalar (Figura 4.36) mostra que o aumento que ocorre na fração de sólidos para região diluída continua até que uma porção de ar tome seu lugar, o que é observado em 0,275s. Esta mesma porção de escoamento diluída pode ser observada pelo corte em yz na Figura 4.35 (0,28s).

A seguir o padrão de escoamento estabiliza-se de modo muito similar ao inicial. A área diluída permanece até que se forme outra perturbação similar à descrita na Figura 4.36.

Vale ressaltar que a interface entre a região diluída e densa era móvel. Assim, a área da região diluída que é observada na Figura 4.36 também varia com o tempo.

A Figura 4.36 também mostra que existe assimetria do escoamento em relação à superfície em que o plano y corta o sistema (por exemplo, nos instantes 0,24, 0,273, 0,275s).

No sistema em questão, apesar da geometria ser simétrica em relação ao corte do sistema pelo plano y, realmente não é esperado que o escoamento seja necessariamente simétrico devido à interação das fases com a parede cilíndrica e entre si, que podem fazer com que elementos de volume das fases cruzem o plano em questão.

Os mesmos efeitos de aumento na concentração de sólidos para a zona diluída podem ser observados na Figura 4.37 para uma superfície pouco acima daquela da Figura 4.36, mas ainda na região cônica.

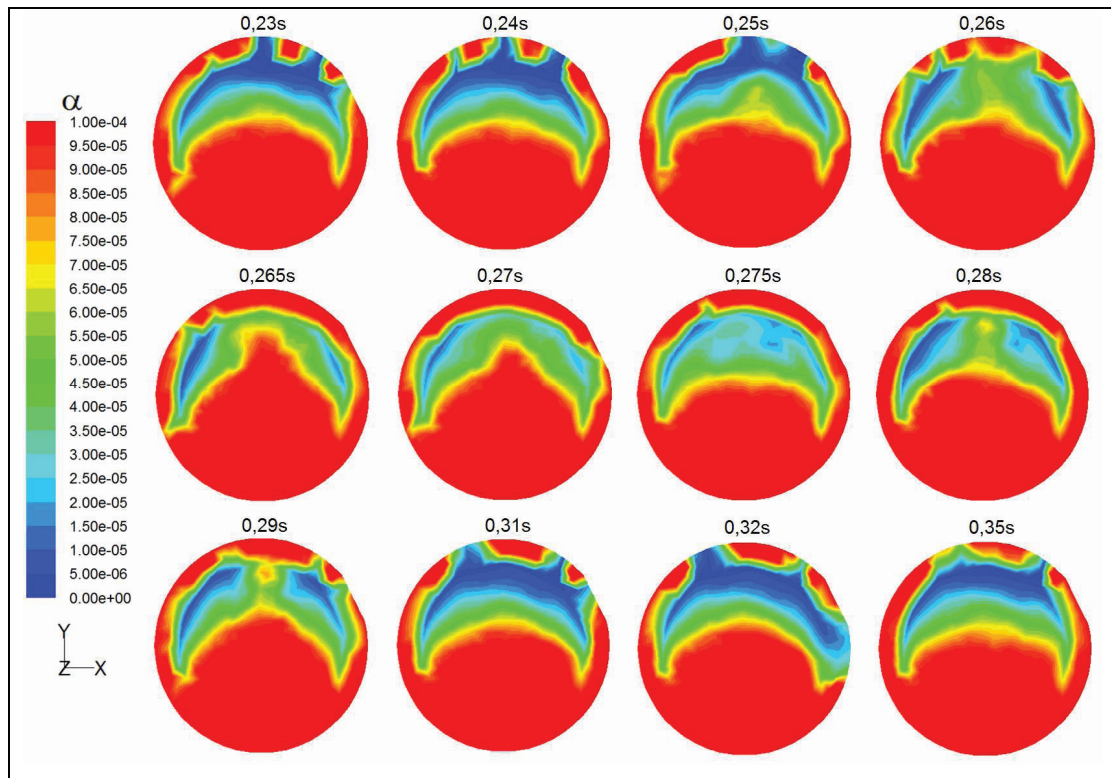


Figura 4.37 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

É importante salientar que as superfícies Sz-C1 e Sz-C2 fornecem cortes do tronco de cone de saída da peça de alimentação, portanto as áreas obtidas das secções em diferentes alturas deveriam ser diferentes. No entanto, as Figura 4.36 e Figura 4.37 são ampliações das superfícies em questão, somente para melhorar a visualização.

Como para Figura 4.36, a Figura 4.37 também apresenta assimetrias em relação ao corte do sistema pelo plano y, mas neste ultimo caso as assimetrias eram mais marcantes.

O aumento na concentração de sólidos para Figura 4.37 indica que as perturbações mais próximas à inserção de material particulado geram perturbações em secções posteriores. Assim, a fração de sólidos na região de baixa densidade próxima à alimentação é ampliada o que eleva em seguida a fração de sólidos em regiões imediatamente posteriores ao alimentador.

Deste modo, o aumento da concentração dos sólidos próximo à alimentação se propaga adiante no sistema.

O resultado do escoamento na alimentação é a eventual formação de agrupamentos de sólidos que se deslocam em relação à região densa para o

centro da tubulação. Mais adiante veremos como estes pequenos agrupamentos se unem às correntes densas de sólidos formando agrupamentos maiores.

A Figura 4.37 mostra também que a região densa próxima à parede na direção positiva de y (lado do conduto de alimentação) tende a tornar-se mais descontínua e a região diluída tende a se ampliar. Esta região densa existe, como dito anteriormente, devido à existência de agrupamentos que são acelerados na direção do transporte, mas depois retornam na direção contrária ao escoamento de ar.

Em secções posteriores essa região densa desaparece, conforme é possível observar a partir da Figura 4.35, pelo desaparecimento do alongamento denso à esquerda.

Ressalta-se que é possível perceber a diluição dos sólidos ao longo do comprimento do leito quando se observa as figuras apresentadas até aqui (superfícies do tipo S_z e S_y) pelo aumento da área diluída no sistema (região azulada).

A Figura 4.38 apresenta os campos escalares para o escoamento multifásico entre 9 e 10 segundos em todo o *trecho ascendente* para a superfície S_y .

Observa-se que o escoamento é heterogêneo em todo o sistema, apresentando agrupamentos em todo o comprimento.

Estes agrupamentos possuem frações de sólido iguais ou maiores que 0,0001, mas não chegam (como estará definido pela Figura 4.43) a atingir concentrações da ordem de grandeza da obtida em regimes densos.

A diluição dos agrupamentos observados confere a eles características muito diferentes dos agrupamentos em escoamento denso. Por exemplo, não foram observados, com exceção dos agrupamentos não transportados no cone divergente do alimentador, agrupamentos em movimento contrário ao escoamento de ar.

No entanto, os agrupamentos obtidos, mesmo que diluídos, são relevantes quando a fração de fase média no sistema é tão baixa (escoamento altamente diluído).

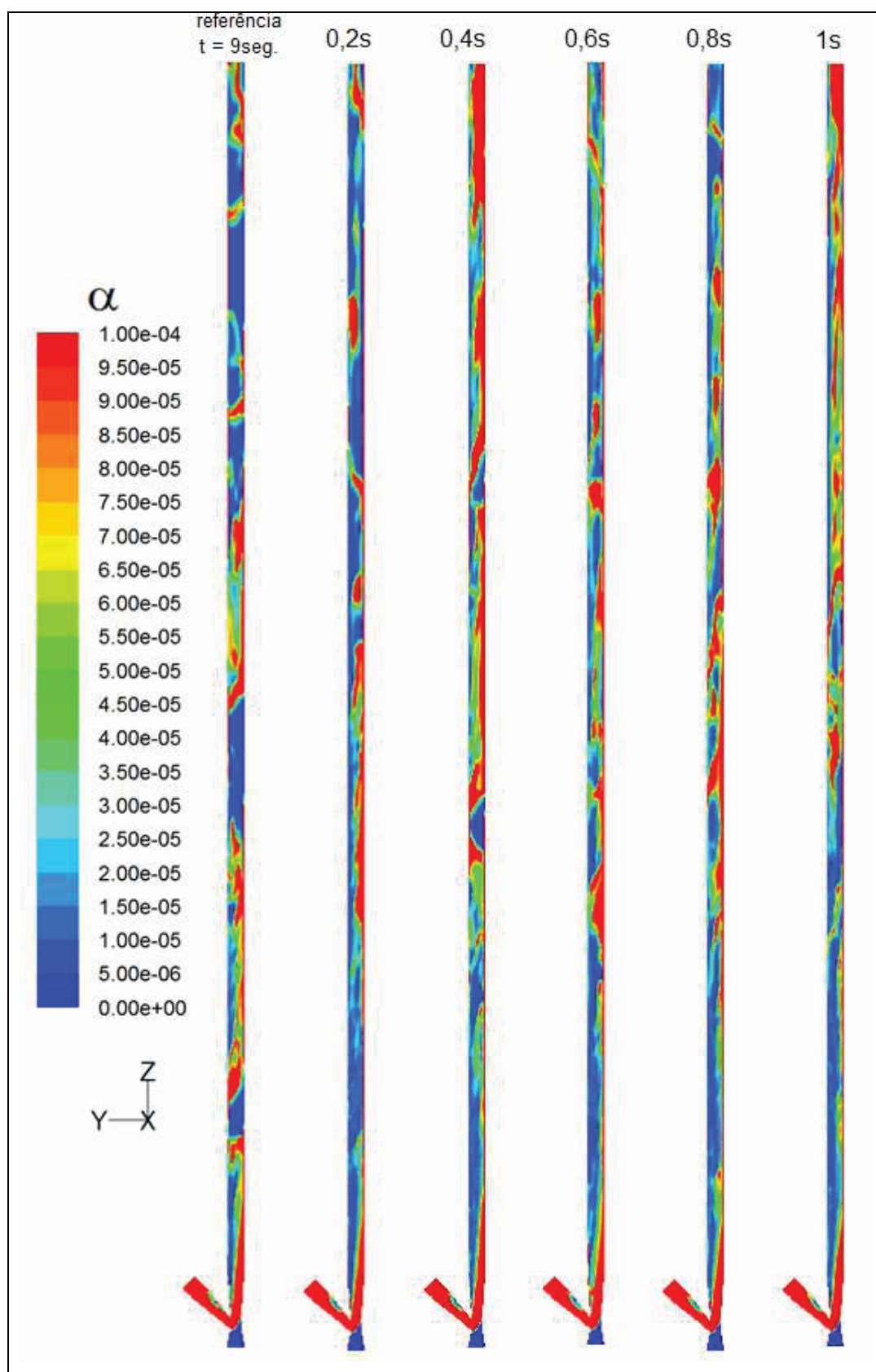


Figura 4.38 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y . Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.39 mostra o escoamento da fase sólida em detalhes até a altura de 1,24m do trecho ascendente.

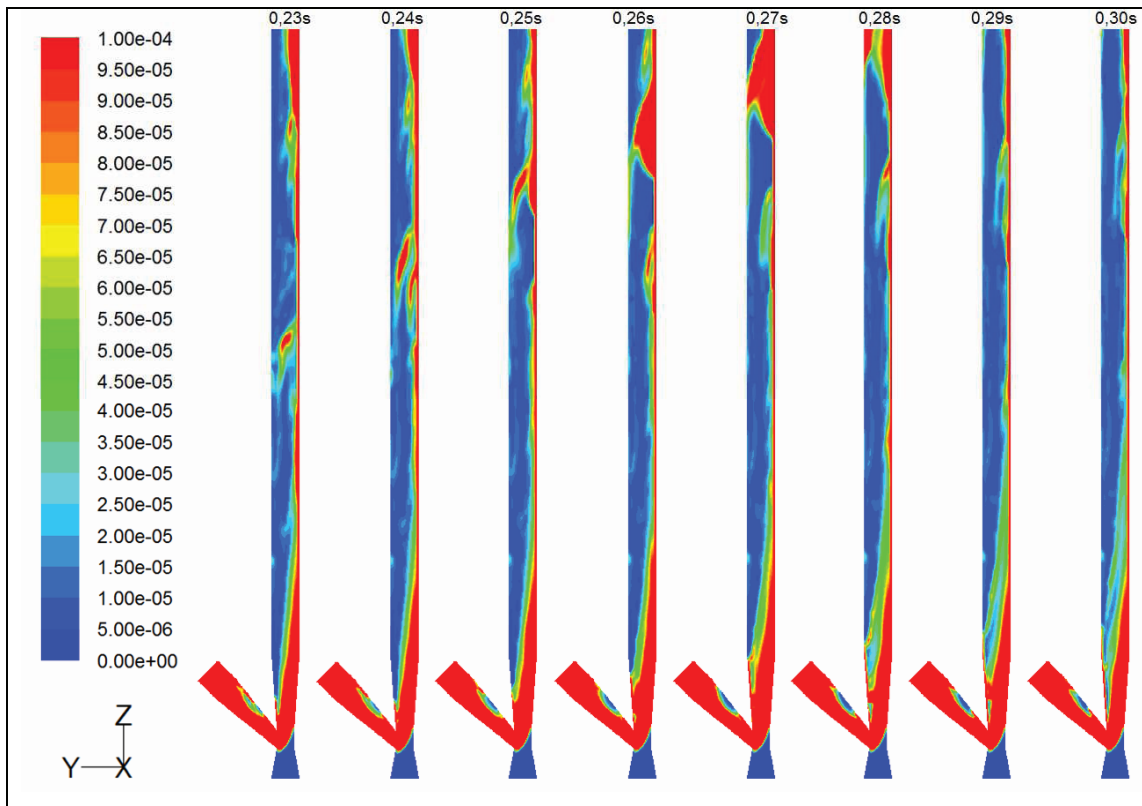


Figura 4.39 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y até a altura 1,24m do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.39 mostra a formação dos agrupamentos em uma região aproximadamente entre 0,7 e 1,16 metros de distância da saída da peça de alimentação pelo acúmulo de correntes da fase sólida e envolvendo também a junção de um agrupamento formado a partir dos mecanismos descritos na Figura 4.36 e Figura 4.37.

A Figura 4.40 mostra o mesmo processo de formação de agrupamentos maiores a partir do acúmulo de sólidos aproximadamente na mesma região do *trecho ascendente*, mas mostrando a junção do agrupamento que pode ser observado em 0,31s na Figura 4.35.

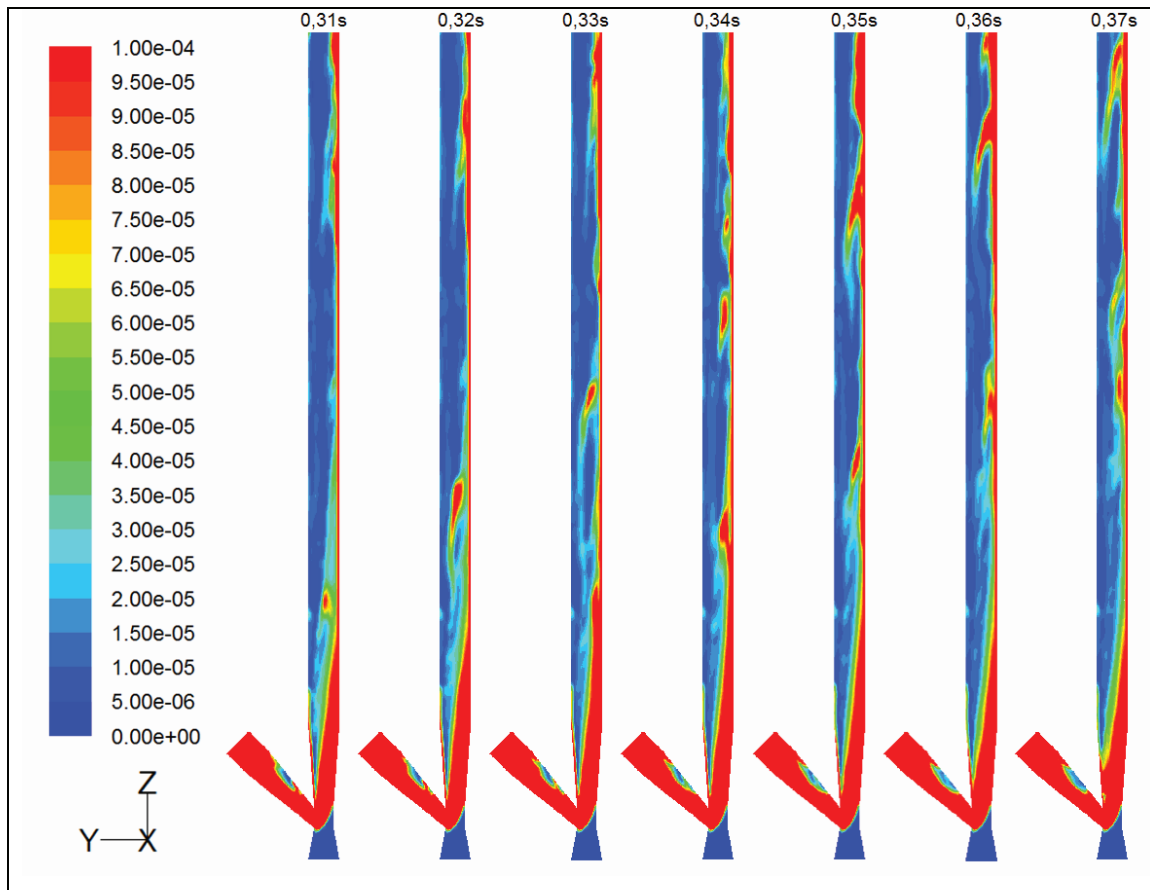


Figura 4.40 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y até 1,17m de altura do trecho ascendente. Malha 2mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.41 mostra o sistema entre a saída do alimentador até 1,6m do trecho ascendente, para os mesmos instantes observados na Figura 4.39.

A Figura 4.41 mostra a formação do agrupamento da Figura 4.39 em mais detalhes e indica que o agrupamento formado tende à dividir-se com a continuidade do escoamento.

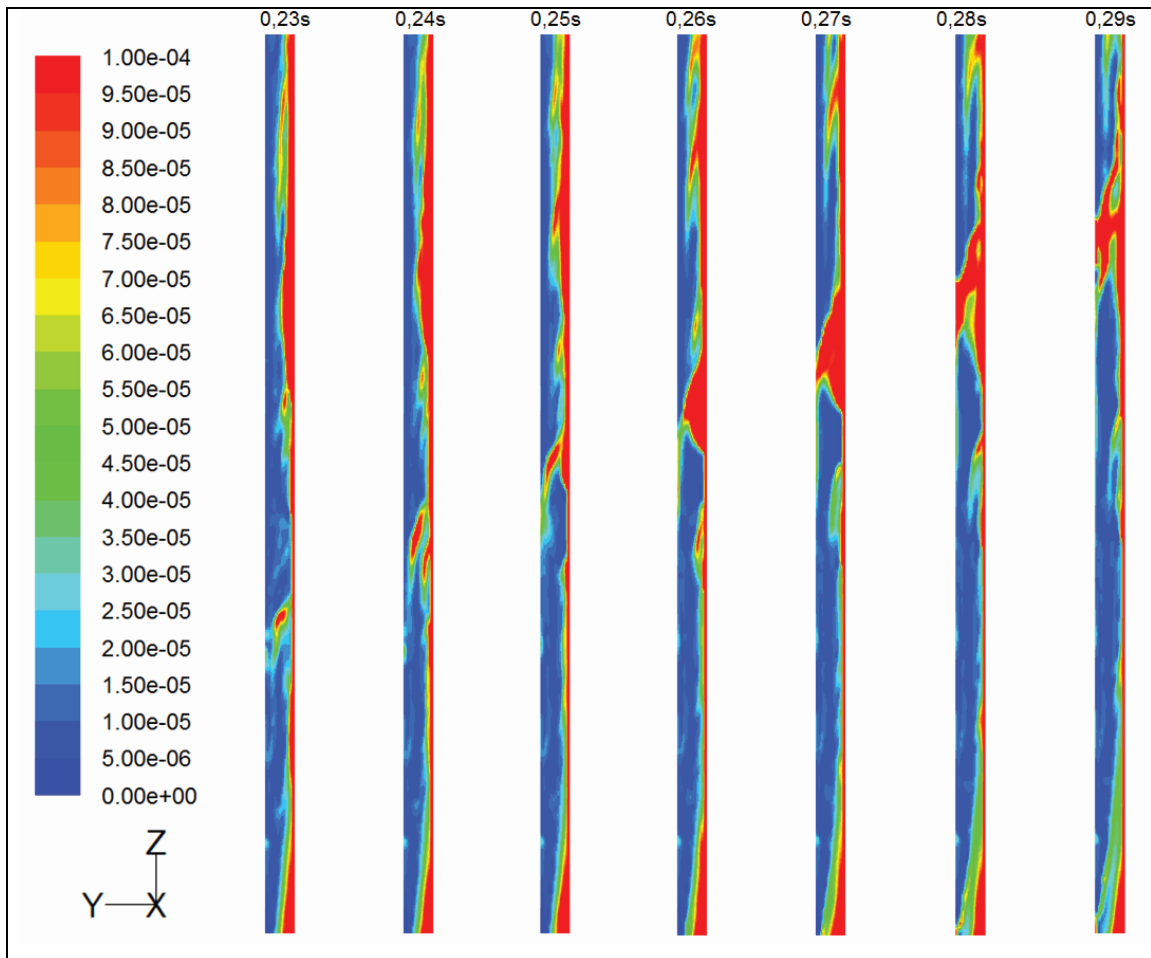


Figura 4.41 – Detalhes da formação do agrupamento da Figura 4.39: campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y entre a saída do alimentador e 1,6m do trecho ascendente.

A Figura 4.42 mostra todo o *trecho ascendente* ao longo do tempo. Os tracejados indicam o agrupamento descrito em detalhes na Figura 4.41.

Observa-se que o agrupamento se divide em dois, mas os agrupamentos formados na divisão tendem a percolar todo o trecho ascendente. Assim, é possível afirmar que efeitos da alimentação não foram dissipados em distâncias curtas do escoamento gás-sólido.

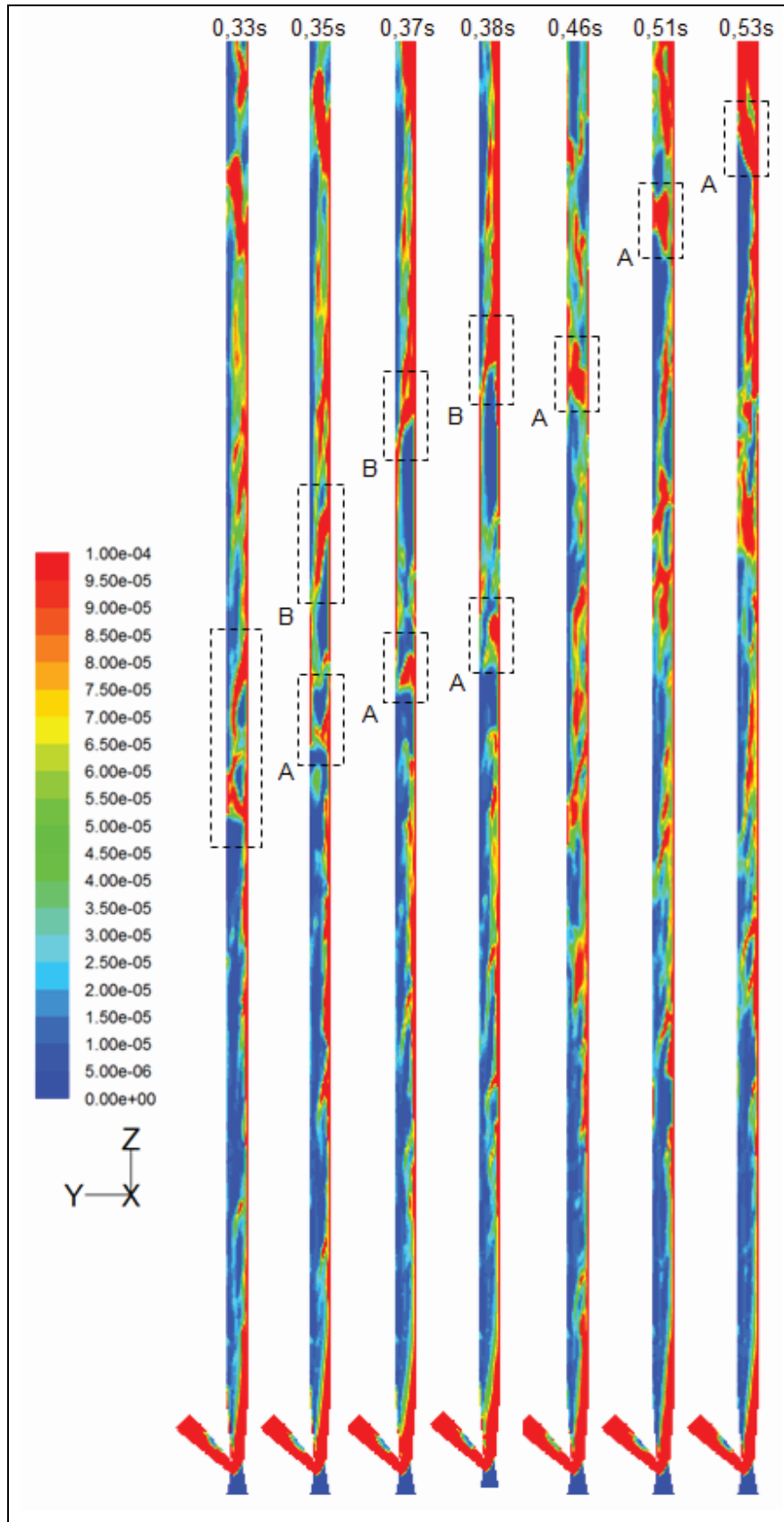


Figura 4.42 – Campo escalar da fração de sólidos na superfície S_y para todo o trecho ascendente ao longo do tempo. Os tracejados acompanham o avanço do agrupamento formado conforme mostra a Figura 4.39 até próximo a saída do trecho ascendente.

A comparação da Figura 4.43 com as anteriores mostra que os agrupamentos tendem a ficar mais concentrados quanto mais próximos às paredes do transportador. Somente é possível perceber este fato devido à diferença nas escalas das figuras.

Também, por esta comparação, é possível observar que os agrupamentos mais distantes das paredes geralmente possuem frações de sólidos menores que 0,001.

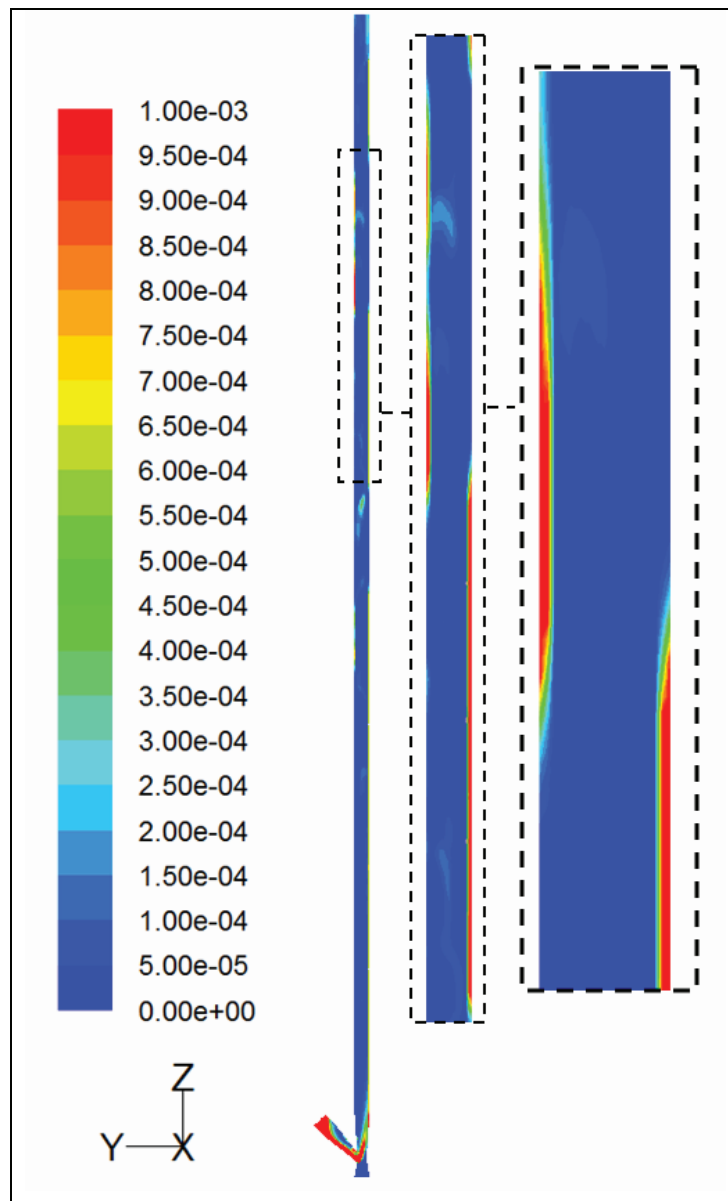


Figura 4.43 – Campo escalar da fração de sólidos na superfície S_y e aproximações de uma região do trecho ascendente em 9,1 segundos de escoamento.

A Figura 4.44 confirma, através de diversas superfícies do tipo Sz, que a fase sólida tende a se concentrar próxima a parede do transportador. Este foi também o resultado obtido por *Zhu et al. (2003)* ao analisar os efeitos de uma curva como entrada para o trecho vertical.

A estrutura descrita para os agrupamentos também é corroborada quando se observa o campo escalar da fração de sólidos para as superfícies da Figura 4.43 e da Figura 4.44 ao longo do tempo na escala até 0,001.

Além disso, os perfis de fração de fase em segmentos de reta do tipo Rw ao longo do tempo indicavam que as frações de sólidos encontradas nas paredes podiam chegar à ordem de grandeza de 0,01.

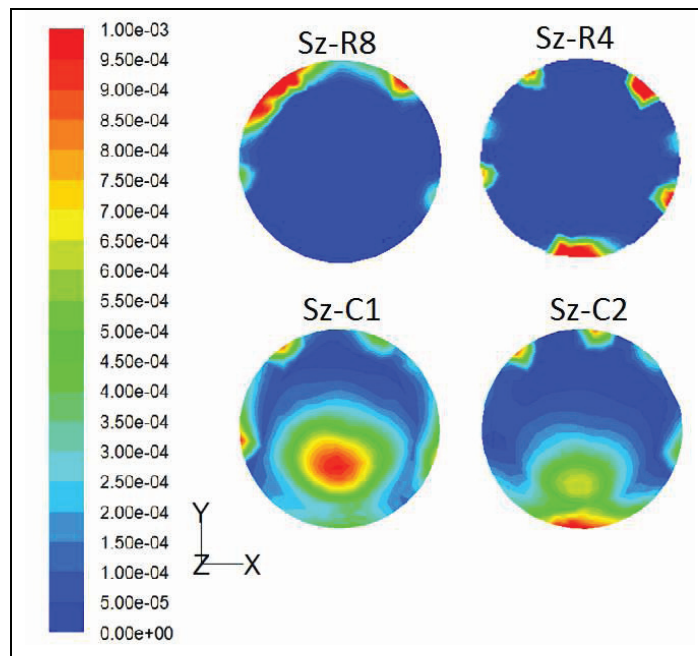


Figura 4.44 – Campo escalar da fração de sólidos para superfícies do tipo Sz em 9,1 segundos de escoamento.

A presença de agrupamentos em comprimentos longos em relação ao comprimento total do trecho vertical simulado e a formação de agrupamentos dependente das interações dos sólidos com a parede na direção oposta ao conduto de alimentação mostraram que de fato o comportamento do escoamento não poderia ser obtido nas simulações bidimensionais.

Em outras palavras, as simulações 2D são inviáveis para prever o comportamento no sistema experimental utilizado (*trecho ascendente* com 3,75m) devido à sua dependência da fluidodinâmica em comprimentos

relativamente longos com as estruturas formadas na alimentação.

Alguns agrupamentos maiores seguiam adiante no trecho vertical e foram observados a até próximo à saída do sistema (Figura 4.42). Assim, não se pode afirmar que os efeitos da alimentação eram dissipados próximos ao alimentador. Esta dissipação é esperada em trechos ascendentes de CFBs operando com particulado finos, principalmente para diâmetros de tubulação pequenos (até em torno de 10cm, *Wilde et al, 2005*) e mesmo operando em regime diluído.

Os resultados de distribuição de sólidos apresentados não puderam ser verificados com dados experimentais detalhados da distribuição de sólidos em trecho vertical com o tipo de alimentação simulada. Entretanto, devido às características inerciais do material granular simulado pode-se justificar a diferença encontrada quando se compara com o caso de particulado fino.

4.4.3 Verificação da fluidodinâmica das simulações 3D com malhas mais refinadas

A verificação da simulação com malha construída com base em 2mm na garganta através dos resultados com malha refinada foi realizada comparando-se os aspectos mais relevantes que foram obtidos para o comportamento da fase sólida no sistema.

Para tanto se verificou a existência de agrupamentos de sólidos com frações de fase superiores à 0,0001 em todo o sistema computacional e a formação de agrupamentos a partir da região próxima à alimentação do material particulado.

Além disso, observou-se o avanço de agrupamentos ao longo do sistema para avaliar se alguns destes agrupamentos percolavam todo o sistema simulado. Por fim, verificou-se a região de desvio da fase sólida pelo ar e o aumento da concentração dos agrupamentos na parede do transportador.

Malha construída com base em 1,5mm na junção dos condutos

A Figura 4.45 apresenta os campos escalares para fração de sólidos em todo o sistema simulado com a malha de 1,5mm. A presença de agrupamentos de frações maiores que 0,0001 ao longo de todo o trecho ascendente foi

verificada.

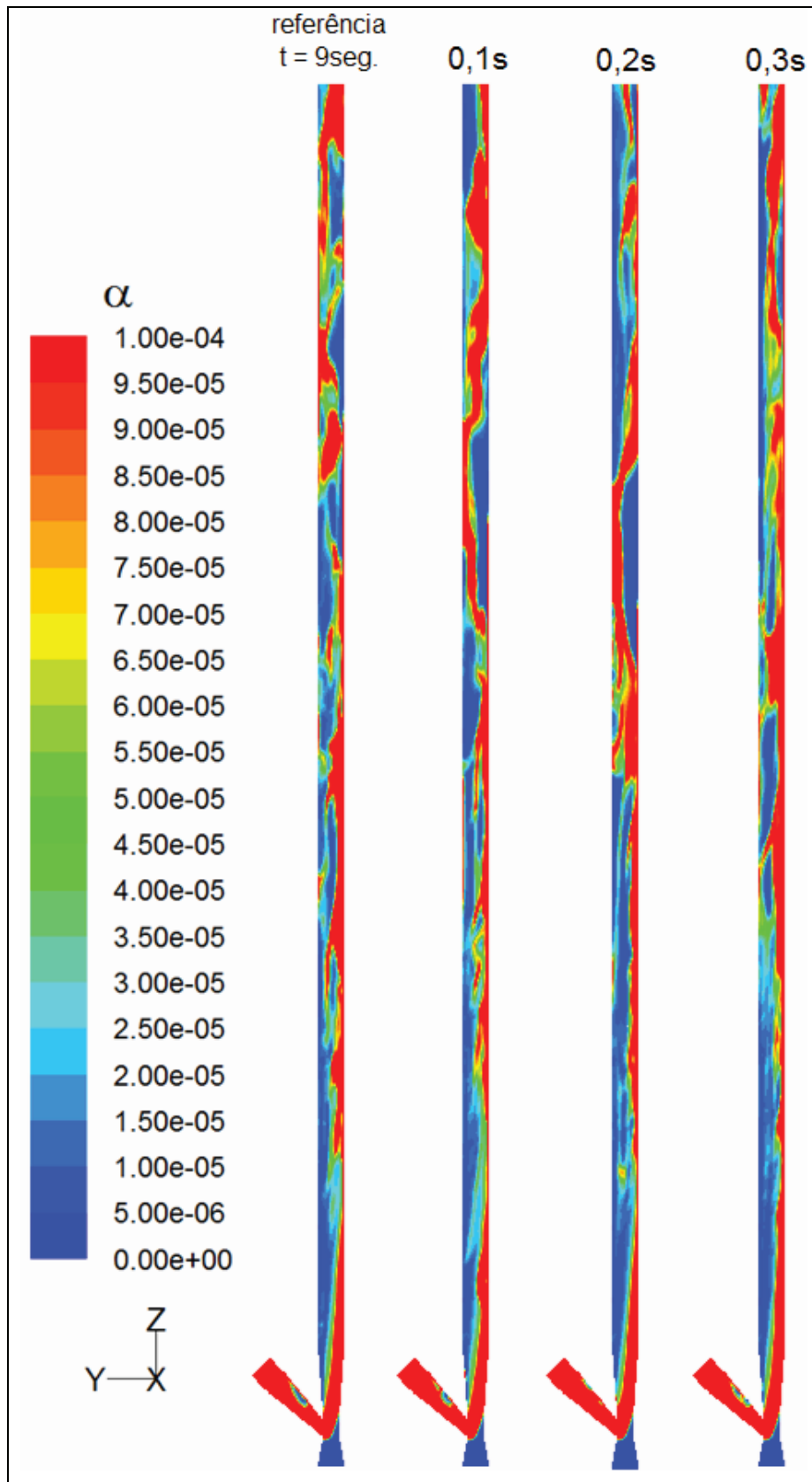


Figura 4.45 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y para todo o trecho ascendente. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.46 mostra a formação dos agrupamentos para região próxima à alimentação.

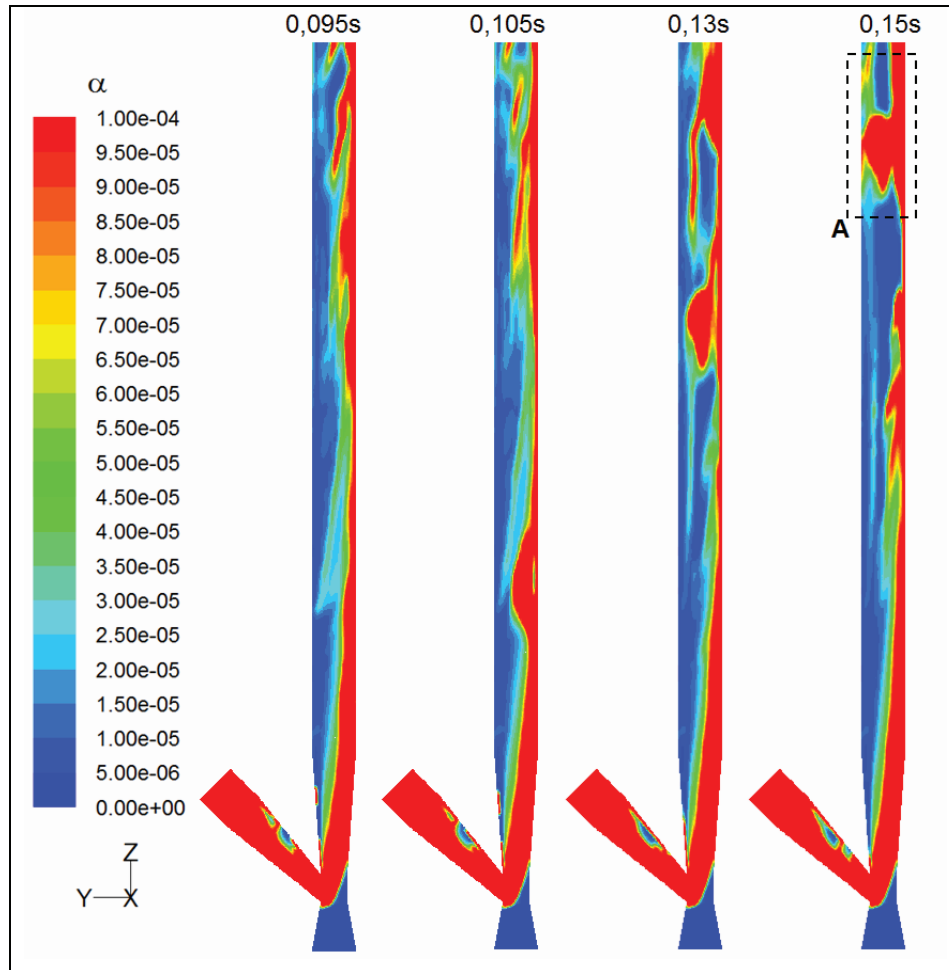


Figura 4.46 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y até 0,85m do trecho ascendente. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

Assim como foi observado para malha de 2mm era comum haver a junção de agrupamentos posteriormente à sua formação. Além disso, os agrupamentos formados na região próxima a alimentação muitas vezes seguiam no trecho ascendente até a saída do sistema.

A Figura 4.47 mostra o escoamento do agrupamento formado conforme mostrou a Figura 4.46 no resto do trecho ascendente simulado. Na sequência à sua formação ele une-se a outro agrupamento formado em trecho posterior no sistema. A Figura 4.47 também mostra que o agrupamento formado desta união segue adiante no trecho ascendente até a saída do volume computacional.

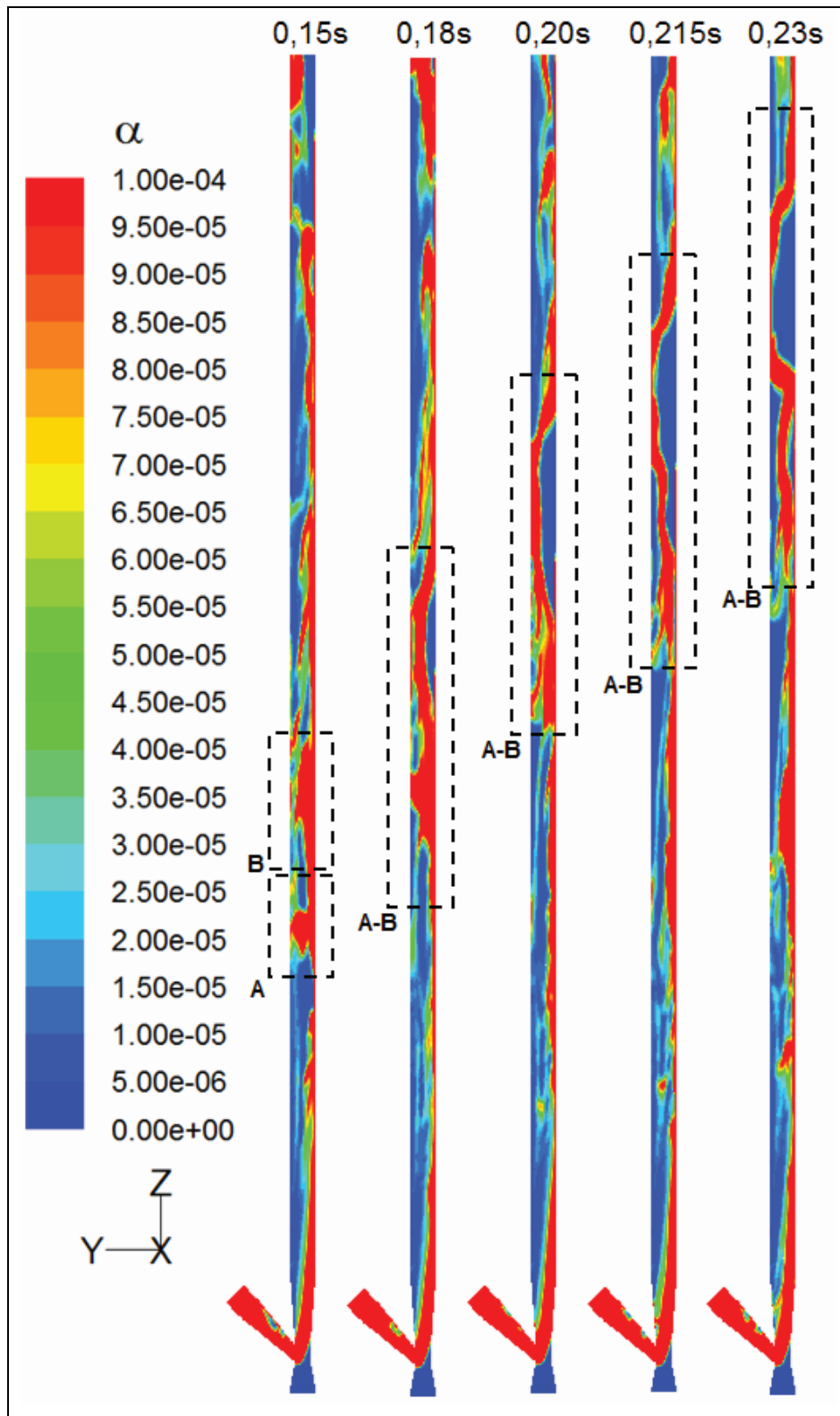


Figura 4.47 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y para todo o trecho ascendente. Destaque dado aos agrupamentos formados no sistema antes de 0,15s. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.48 mostra os campos escalares para fração de sólidos na superfície Sz-C1. Observou-se a mesma região de desvio na simulação com malha de 1,5mm que foi observada para malha de 2mm.

Além disso, é possível também verificar a existência de alta concentração de sólidos na direção do conduto de alimentação (direção y na Figura 4.48) com agrupamentos que não eram transportados na direção principal do escoamento.

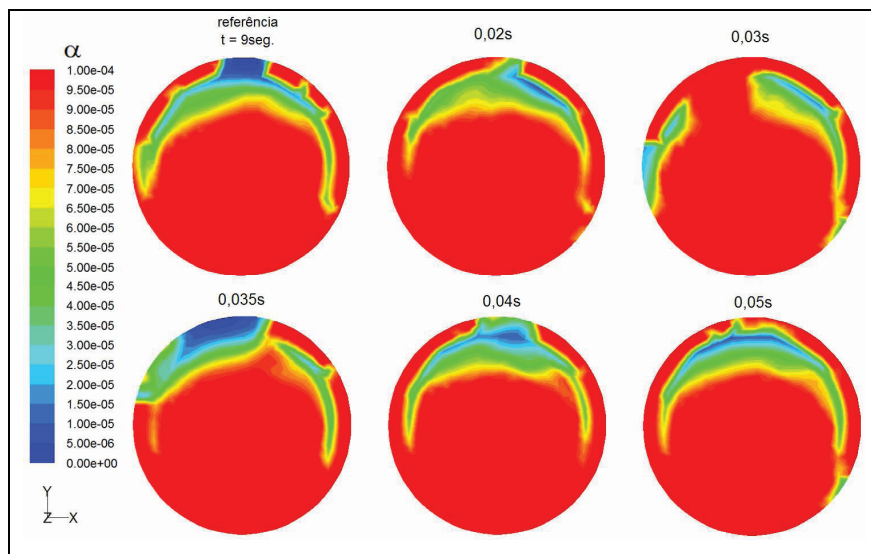


Figura 4.48 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.49 mostra que a distribuição da fase sólida na superfície Sz-C2 para simulação com malha 1,5mm também verificou a região de desvio encontrada na simulação com malha construída com base em 2mm.

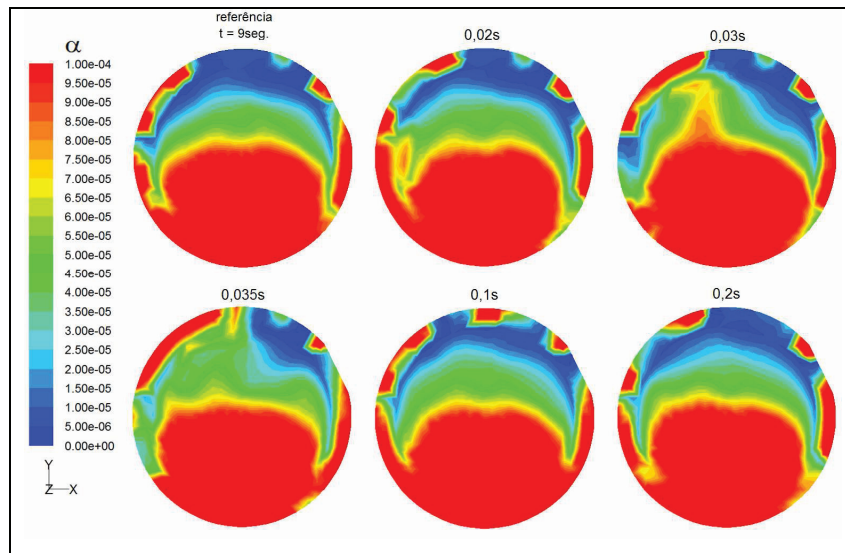


Figura 4.49 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.50 mostra que, assim como correu com a malha de 2mm, também com a malha mais refinada a fase sólida geralmente tendia a estar mais concentrada quando próximo à parede do transportador.

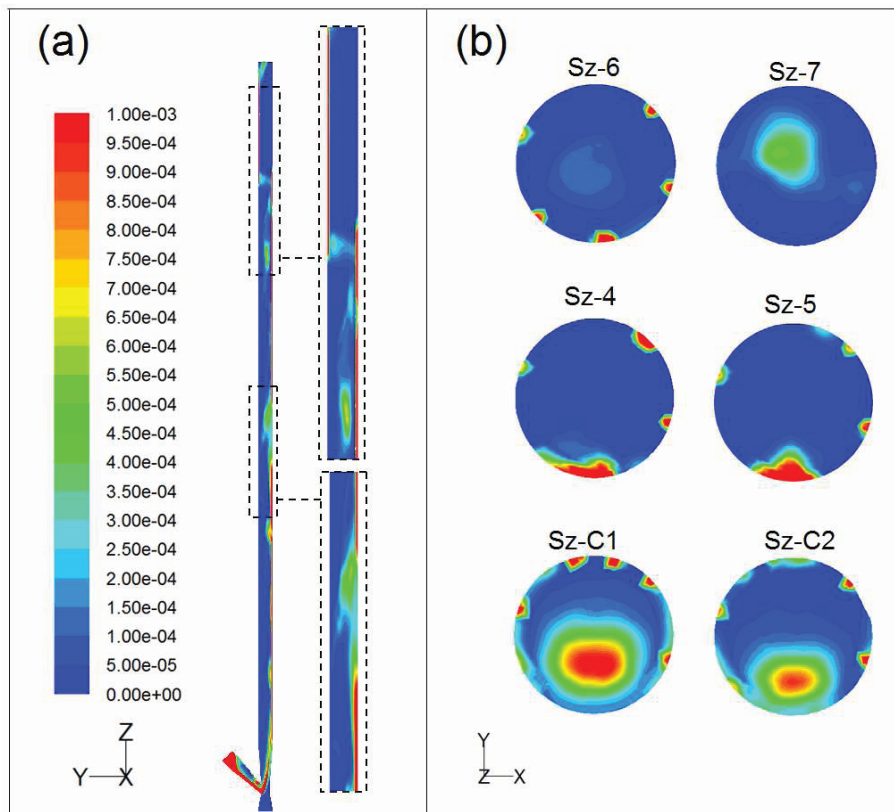


Figura 4.50 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sy em 9,25 segundos. Malha de 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo. a – trecho ascendente e regiões em destaque. b – superfícies do tipo Sz.

Malha construída com base em 1,2mm na junção dos condutos

A Figura 4.51 mostra a formação de um agrupamento próximo à alimentação de sólidos para malha de 1,2mm na junção dos condutos, verificando o que foi observado nas simulações com malhas mais grosseiras. A figura também mostra que o agrupamento seque adiante no trecho ascendente simulado.

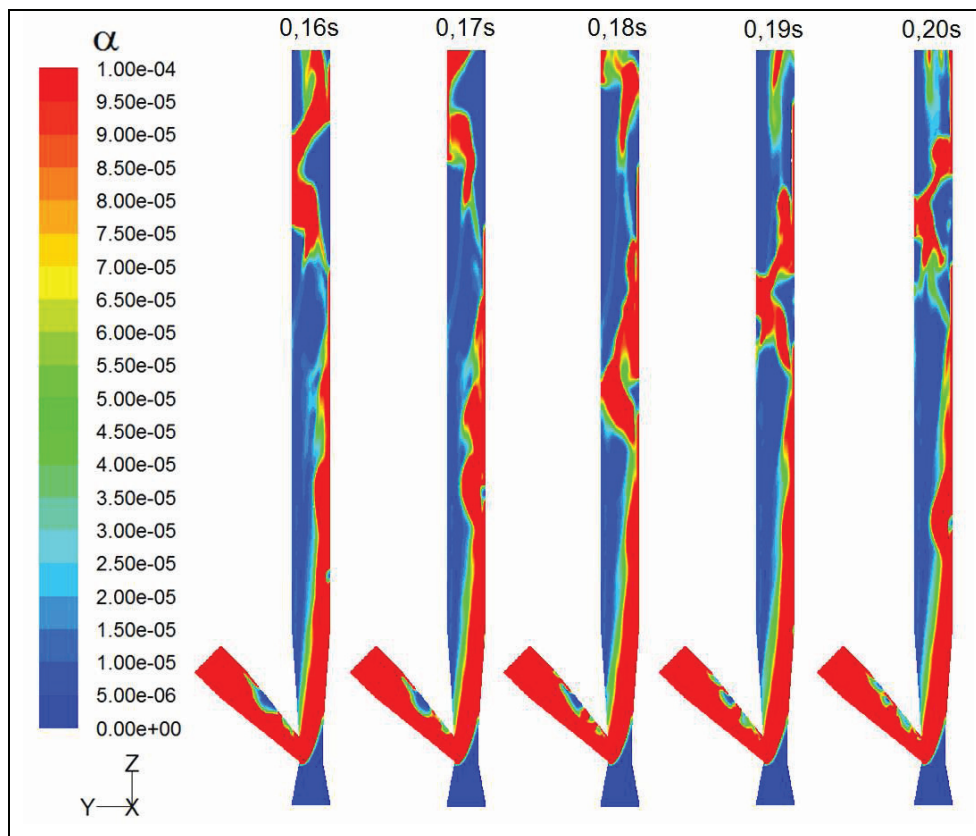


Figura 4.51 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície S_y – trecho ascendente completo. Malha 1,5mm e coeficiente de especularidade nulo.

A Figura 4.52 e a Figura 4.53 mostram que a simulação para malha com base em 1,2mm verificou a região de desvio dos sólidos pelo ar na entrada de sólidos no trecho ascendente.

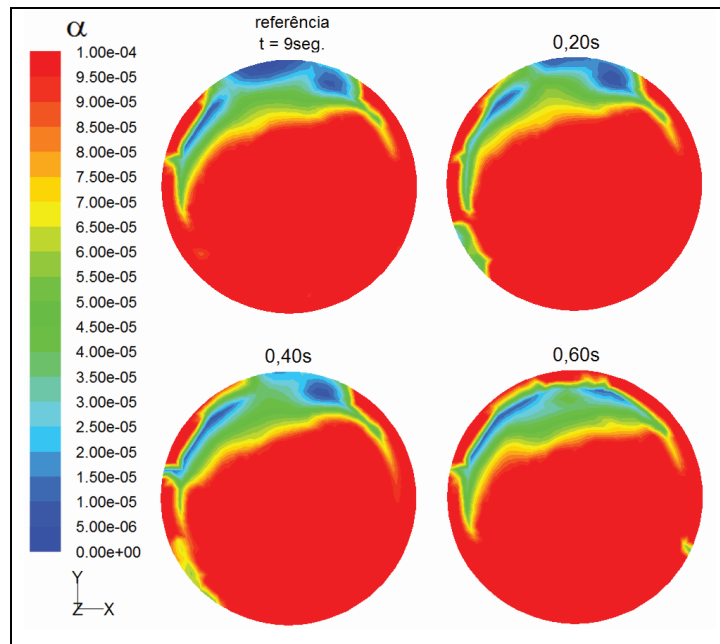


Figura 4.52 – Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C1. Malha 1,2mm e coeficiente de especularidade nulo.

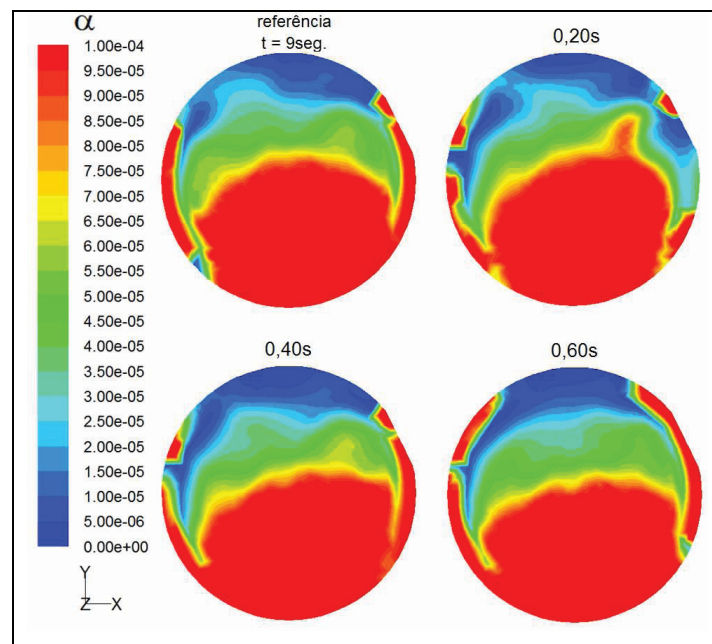


Figura 4.53 - Campo escalar para fração de sólidos em diferentes instantes de tempo para superfície Sz-C2. Malha 1,2mm e coeficiente de especularidade nulo.

A formação da região densa na direção do conduto de alimentação parece não estar presente com a mesma frequência na simulação com malha de 1,2mm (Figura 4.52 e a Figura 4.53). Entretanto, é importante lembrar que a malha em questão pode estar causando aumento do erro numérico de

arredondamento durante o processo de solução (seção 4.4.1).

Assim, não é possível dizer se a ausência do anel denso era devida à redução de erros pelo refinamento da malha, sendo mais representativo do sistema real, ou pelo aumento de erro numérico de arredondamento.

4.4.4 Observações finais

Outros tipos de alimentadores não foram simulados e poderiam a priori originar estruturas de escoamento totalmente diferentes. Principalmente, porque os mecanismos que predominantemente originavam os agrupamentos observados não foram estudados e identificados em detalhes.

Assim, o estudo da fluidodinâmica em sistemas de alimentação na vertical com particulado grosseiro precisa estar muito mais preocupado com as características do alimentador utilizado do que os estudos com particulado fino nos mesmos diâmetro de tubulação.

Simulações com coeficiente de especularidade 0,2, utilizando malhas com base em 2mm e 1,5mm, apresentaram muitas similaridades com os resultados obtidos com o coeficiente de especularidade nulo.

Entretanto, a formação de agrupamentos pareceu ser mais freqüente. Além disso, os agrupamentos pareceram maiores. Estas características da fluidodinâmica da fase granular poderiam explicar o aumento observado na perda de pressão da região linear para as simulações com coeficiente de especularidade 0,2 quando em comparação com simulações de coeficiente de especularidade nulo.

Estudos mais aprofundados seriam necessários para comprovação quantitativa com relação à freqüência de formação de agrupamentos, assim como a dimensão característica dos mesmos.

5 Conclusões

5.1 Conclusões experimentais

As principais finalidades dos ensaios eram fornecer as condições de vazão de ar e de sólidos a serem simuladas e oferecer dados de perda de pressão para verificação das simulações da alimentação de sólidos em Venturi com orientação vertical nessas condições. Apesar disto, a partir dos resultados experimentais algumas conclusões puderam ser obtidas. As principais estão em destaque a seguir:

- a correlação linear entre a vazão de sólidos e a vazão de ar representa bem os resultados obtidos para o alimentador utilizado;
- o coeficiente angular da reta que correlaciona a vazão de sólidos à de ar foi positivo, indicando que a vazão de sólidos aumenta à medida que aumenta a vazão de ar.
- o comportamento qualitativo da perda de pressão ao longo da direção principal de escoamento no leito é o mesmo para o escoamento monofásico (somente ar) e gás-sólido;
- o trecho em que foi considerada dependência linear entre pressão e comprimento percorrido ficava entre 0,442m (t4) e 3,18m (t9) em todas as condições experimentais e tanto em ensaios com sólidos como sem sólidos.

A condição de velocidade média de ar em 29,5m/s ($3,9\text{m}^3/\text{min}$) foi selecionada para simulação do transportador, o que fornecia vazão de sólidos de 29,6Kg/h.

5.2 Simulações 2D (simetria axial)

Apesar de a simetria axial ser inválida para o alimentador simulado, as simulações bidimensionais foram realizadas com o objetivo de encontrar um

padrão radial de escoamento para regiões que se afastassem da alimentação. A partir de tais simulações foram obtidas as seguintes conclusões principais:

- a diferença considerável obtida entre os dados experimentais de pressão ao longo do transportador e os dados obtidos da simulação confirmou que a simetria axial é inválida para o alimentador simulado;
- estruturas de escoamento em padrão centro(concentrado)-anular(diluído)-parede(concentrado) eram formadas na região próxima à alimentação;
- as estruturas formadas na alimentação não se dissipavam até a saída do trecho ascendente simulado, que possuía mesmo comprimento do trecho experimental;
- devido à invalidade da simetria e a propagação do padrão de escoamento formado na alimentação até a saída do transportador concluiu-se que não é possível utilizar simulações 2D para estudar a o sistema experimental em questão, mesmo em regiões distantes da alimentação de sólidos.

5.3 Simulações 3D

A seguir constam as principais conclusões obtidas a partir das simulações tridimensionais:

- é recomendável a utilização de aproximação de segunda ordem para os termos convectivos da equação de transporte da energia cinética turbulenta da fase fluída nas simulações do alimentador Venturi em questão;
- o coeficiente de especularidade influi na perda de pressão por comprimento obtida para o trecho linear da pressão no transportador, que é maior quanto maior for o coeficiente (entre zero e 0,2);
- a região de desvio (*bypass*) dos sólidos pelo ar na alimentação ocorre na direção oposta ao conduto de alimentação;
- agrupamentos de sólidos com frações de fase sólida maiores que

- 0,0001 foram obtidos em todo o trecho vertical;
- a fração de sólidos aumenta nos agrupamentos à medida que são observados mais próximos à parede do transportador;
 - a formação de agrupamentos de sólidos ocorre a partir da região próxima à alimentação;
 - a alimentação, portanto, influi na fluidodinâmica da fase sólida para todo o sistema simulado, cujo comprimento é o mesmo que o utilizado experimentalmente;
 - estudos sobre o transporte pneumático com alimentação na vertical devem considerar a configuração de alimentação e seu impacto no trecho ascendente para comprimentos relativamente longos.

A literatura carece de resultados experimentais relacionados à alimentação na vertical. Principalmente, há ausência de resultados sobre o detalhamento em relação ao escoamento da fase granular. Assim, dados de pressão ao longo do transportador foram utilizados para verificação experimental das simulações.

A perda de pressão calculada pelas simulações 3D se aproximou dos dados experimentais e apresentou comportamento qualitativo similar. Além disso, o refinamento da malha de 2mm para 1,5mm indicou melhora na concordância com os resultados experimentais.

As malhas mais refinadas (em 1,5mm e 1,2mm) foram, portanto, utilizadas para verificação dos aspectos fluidodinâmicos mais relevantes que foram obtidos na malha de 2mm. Essas simulações foram realizadas em trechos verticais mais curtos para reduzir o tempo computacional necessário.

Os dados de pressão não são suficientes para plena verificação experimental das simulações realizadas. Deste modo, são necessárias medidas experimentais sobre o detalhamento do escoamento no sistema em estudo para verificação mais ampla e confiável das simulações realizadas.

No entanto, tendo em vista exatamente a carência de dados na literatura e a qualidade com que os dados experimentais de pressão foram preditos pelas simulações, certamente a tese contribuiu significativamente para o conhecimento do tema proposto. Tendo inclusive definido a faixa operacional a ser utilizada nas simulações.

Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões principais, que foram propostas com base nos resultados e métodos da tese, estão a seguir:

- verificação experimental do sistema simulado através do detalhamento do comportamento de material particulado, para o qual existem diversas técnicas disponíveis, como PVI (*Particle Image Velocimetry*) ou métodos baseados em eletrocapacitância;
- implementação de modelos mais complexos, como métodos baseados em referencial Lagrangeano, para comparação com os resultados da tese;
- analisar o comportamento do material particulado em diferentes configurações de alimentação na vertical, tanto em simulação como experimentalmente;
- analisar o efeito de outras configurações do alimentador Venturi no transporte pneumático, como a orientação e estrangulamento;
- estudar a formação de agrupamentos no sistema em estudo para a melhor compreensão e descrição dos mecanismos que os ocasionam.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA A R F. *Análise da secagem de pastas em leito de jorro*. Tese de doutorado, PPG-EQ - UFSCar, São Carlos, 2009
- ARASTOPOUR H. Pneumatic transport of solids. In: CHEREMISINOFF, N.P. Encyclopedia of fluid mechanics. Texas: *Gulf Publishing Company*, 1986
- ARASTOPOUR H. Numerical simulation and experimental analysis of gas-solid flow systems: 1999 Fluor-Daniel Plenary lecture. *Powder Technology*, review article, v.119, p.59–67, 2001.
- BÉTTEGA R; ROSA C A; CORREA R G; FREIRE J T. Fluid Dynamic Study of a Semicylindrical Spouted Bed: Evaluation of the Shear Stress Effects in the Flat Wall Region Using Computational Fluid Dynamics. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.48, p.11181–11188, 2009.
- BIRD R B; STEWART W E; LIGHTFOOT E N. Fenômenos de transporte. Segunda edição em português. Editora LTC, 2004.
- CHENG Y; WEI F; YANG G Q.; JIN Y. Inlet and outlet effects on flow patterns in gas–solid risers, *Powder Technology*, v. 98, p.151–156, 1998.
- CHU KW; YU AB. Numerical simulation of complex particle-fluid flows. *Powder Technology*, v.179, p.104-14, 2008.
- COSTA I A; CARMO M F; FREIRE J T. Analysis of regime transitions and flow instabilities in a vertical conveying of coarse particles using different solids feeding systems. *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, v.82, p.48-59, 2004.
- DING J; GIDASPOW D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. *A.I.Ch.E Journal*, v.36, p. 438-523, 1990.
- DU B; WARSITO W; FAN L S. ECT Studies of the chocking phenomenon in a gas-solid circulating fluidized bed. *Particle technology and fluidization*, v.50, p.1386-1406, 2004.
- FERREIRA M C. Desenvolvimento de um secador leito pneumático com reciclo de sólidos e com alimentador tipo jorro. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia química, UFSCar, São Carlos, 1991.
- Fluent User's Guide, versão 6.3, 2005.
- FOKEER S; KINGMAN S; LOWNDES I; REYNOLDS A. Characterization of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying - a review. *Chemical Engineering and Processing*, v. 43, p. 677-691, 2004.

- FREIRE J T; SILVEIRA A M (*editores*). Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações. São Carlos, Suprema, 2009.
- GELDART D. Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*, v.7, p. 285-292, 1973.
- GIDASPOW D; BEZBURUAH R; DING J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach, *Fluidization VII*. Proceedings of the 7th engineering foundation conference on fluidization, p. 75-82, 1992.
- GIDASPOW D. Multiphase flow and fluidization, continuum and kinetic theory descriptions. *Academic press*, 1994.
- GRACE J R; AVIDAN A A, KNOWLTON T M. (*editores*). Circulating fluidized beds. Blackie Academic & Professional, Chapman and Hall, Londres, 1997.
- GRACE J R; & TAGHIPOUR F. Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds. *Powder Technology*, v.139, p.99-110, 2004.
- GRBAVCIC Z B; GARIC-GRULOVIC R V; ARSENIJEVIC Z LJ. Prediction of the choking velocity in vertical pneumatic conveying of coarse particles. v.161, p. 1-9, 2006.
- GUNGOR A; ESKIN N. Two-dimensional coal combustion modeling of CFB. *Int. J. Therm. Sci.*, v. 47, p. 157-174, 2008.
- HIMMELBLAU D M. Process analysis by statistical methods. John Wiley & Sons, USA, 1970
- HINZE J O. *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- HUBER N; SOMMERFELD M. Characterization of the Cross-sectional Particle Concentration Distribution In Pneumatic Conveying Systems. *Powder Technology*, v. 79, p. 191-210, 1994.
- ISHII M. Thermo-fluid dynamic theory of two phase flow. Paris, Eyrolles, 248p., 1975.
- JOHNSSON F; ZIJERVELD R C; SCHOUTEN J C; VAN D E N BLEEK C M; LECKNER B. Characterization of Fluidization regimes by time-series analysis of pressure Fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, v.26, 663-715, 2000.
- KIM JS; TACHINO R; TSUTSUMI A. Effects of solids feeder and riser exit configuration on establishing high density circulating fluidized beds. *Powder technology*, 187:37-45, 2008.
- LOPES C S. Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em engenharia química, UFSCar, São Carlos, 2007

- LOPES C S. Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático. Tese de doutorado, programa de pós-graduação em engenharia química, UFSCar, São Carlos, 2011.
- LOPES C S; PÁDUA T F; FERREIRA M C; FREIRE J T. Influence of the entrance configuration on the performance of a non-mechanical solid feeding device for a pneumatic dryer. *Drying Technology*, v.29, p.1186-1194, 2011.
- LUN C K K; SAVAGE S B; JEFFREY D J. Kinetics theories for granular flow: Inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in general flow field. *Journal of fluid mech.*, v.140, p. 223-256, 1984.
- MA A C; WILLIAMS K C; ZHOU J M; JONES M G. Numerical study on pressure prediction and its main influence factors in pneumatic conveyors. *Chemical engineering science*. v.65, p. 6247-6258, 2010.
- MARCUS R D; LEUNG L S; KLINZING G E; RIZK F. Pneumatic conveying of solids, *Londres: Chapman and Hall*, 575 pag., 1990.
- MATHUR K B; EPSTEIN P E. Spouted Bed, Ed. Academic Press, New York, 1974.
- MARTIN S; WILLIAMS J R (*editores*). Multiphase flow research. NOVA science publishers, 2009.
- MILIOLI C L C. Simulação de Escoamentos Gás-Sólido Reativos em Leitões Fluidizados Circulantes. Tese de doutorado, EESC-USP, 2006.
- MILLS D. Pneumatic conveying design guide, *Elsevier*, segunda edição, 637 pag., 2004.
- NARIMATSU C P; FERREIRA M C; FREIRE J T. Drying of coarse particles in a vertical pneumatic conveyor. *Drying Technology*, v.25, p.291-302, 2007.
- OGAWA S; UMEMURA A; OSHIMA N. On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials. *J. Appl. Math. Phys.*, 31:483, 1980.
- PATROCÍNIO A B. Contribuição ao estudo do escoamento gás-sólido na presença de curvas. Tese de doutorado, programa de pós-graduação em engenharia química, UFSCar, São Carlos, 2006.
- PERRY R H. Chemical Engineer's Handbook. edição 7, *Nova York: McGraw-Hill*, 1999.
- PETTYJOHON E S; CHRISTIANSEN E B. Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particle. *Chemical engineering process*, v.44, n^o2, p.157-172, 1948.
- RAJAN K S; SRIVASTAVA S N; PITCHUMANI B; DHASANDHAN K. Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 1932-1941, 2008a.

- RAJAN K S; DHASANDHAN K; SRIVASTAVA S N; PITCHUMANI B. Studies on gas-solid heat transfer during pneumatic conveying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, p. 2801-2813, 2008b.
- RAJAN, K S; SRIVASTAVA, S N; PITCHUMANI, B; SURENDIRAN, V. Thermal conductance of pneumatic conveying preheater for air-gypsum and air-sand heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, v.49, p.182-186, 2010.
- RATNAYAKE C. A Comprehensive Scaling Up Technique for Pneumatic Transport Systems. Phd Thesis, Telemark University College, 2005.
- RODRIGUES M I; IEMMA A F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. Casa do pão, Campinas, 2005.
- SIMONIN C; VIOLLET P L. Predictions of an Oxygen Droplet Pulverization in a Compressible Subsonic coflowing hydrogen flow. *Numerical Methods for Multiphase Flows*, FED91:65-82, 1990.
- SOUSA, R C; ALMEIDA, A R F; FERREIRA, M C; FREIRE, J T. Analysis of Fluid Dynamics and Thermal Behavior Using a Vertical Conveyor with a Spouted Bed Feeder, *Drying Technology*, v. 28, p.1277-1287, 2010.
- SYAMLAL M; ROGERS W; O'BRIEN T J. MFX Documentation Volume 1, theory guide. National technical information service, Springfield, VA, *DOE/METC-9411004, NTIS/DE9400087*, 1993.
- VASHISTH S; GRACE J R. Simulation of Granular Transport of Geldart Type-A, -B, and -D Particles through a 90 degrees Elbow. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, p. 2030-2047, 2012.
- WEN C Y; YU Y H. Mechanics of fluidization. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 62:100-111, 1966.
- WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD. DCW industries, Second edition, 2004.
- WILDE DE J.; VAN ENGELANDT G; HEYNDENICKX GJ; MARIN, GB. Gas-solids mixing in the inlet zone of a dilute circulating fluidized bed. *Powder Technology*, v.151, p.96-116, 2005.
- XIONG Y; ZHANG M; YUAN Z. Three-dimensional numerical simulation method for gas–solid injector. *Powder Technology*, 160:180-189, 2005.
- YILMAZ A; LEVY E K. Formation and dispersion of ropes in pneumatic conveying. *Powder Technology*, v.114, p. 168-185, 2001.
- YOSHIDA H. Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a revised-type cyclone. *Colloids and and surfaces A, physico-chemical and engineering aspects*. V.20, p2-12, 1996.
- YOU J; ZHU C; DU B; FAN LS. Heterogeneous structure in gas-solid riser

flows. *AIChE Journal*, v.54, 1459-1469, 2008.

YOU J; WANG, D; ZHU, C. Entrance effects on gas-solid riser flow structure. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 48, p. 310-319, 2009.

ZHU K W; RAO S M; WANG C H; SUNDARESAN S. Electrical capacitance tomography measurements on vertical and inclined pneumatic conveying of granular solids. *Chemical Engineering Science*, v. 58, p. 4225-4245, 2003.

ZHU H P; ZHOU Z Y; YANG R. Y; YU A B. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62:3378—3396, 2007.

Apêndice A – Manual de operações do programa de aquisição (versão 1.0)

A Figura A.1 apresenta a tela de iniciação do programa de aquisição de dados.

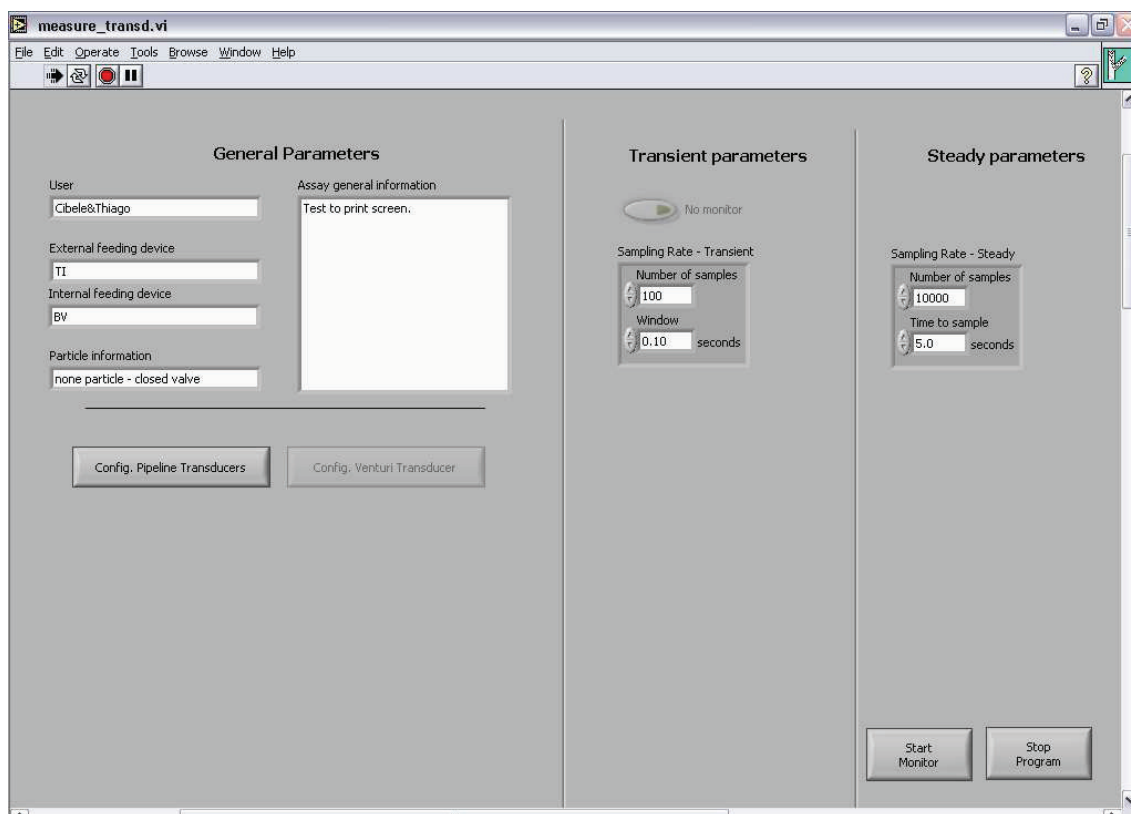


Figura A.1 - Tela de iniciação do programa de aquisição de dados.

As informações adicionadas em “*User*”, “*External feeding device*”, “*Internal feeding device*” e “*Assay general information*” são apenas para documentação do ensaio e serão armazenadas em disco rígido (arquivo “*Log*”).

A parte definida como “*Transient parameters*” ainda não está ativa, uma vez que o monitoramento transiente não foi implementado na versão 1.0 do programa.

“*Sampling Rate - Steady*” define o número e tempo de amostragem no regime permanente. Portanto, também define a taxa de amostragem (*samples/seconds*) para execução das aquisições.

O botão “*Config Pipeline Transducers*” inicia a tela apresentada na Figura A.2. Nesta tela o usuário define os parâmetros de cada transdutor do sistema.

Quando for necessária a inclusão de outros transdutores, após a instalação física dos mesmos, bastará configurar os parâmetros da tela para obter os resultados de pressão de cada novo elemento.

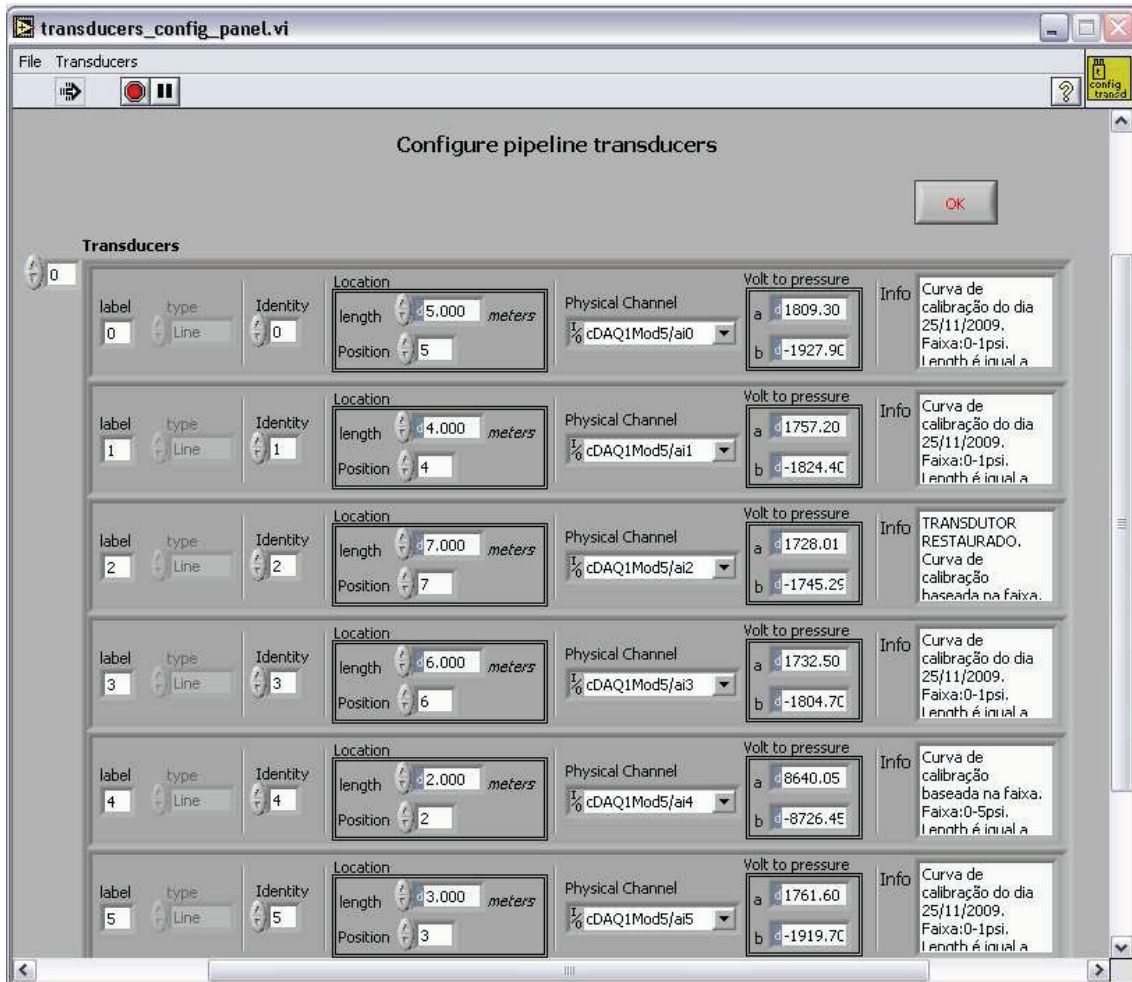


Figura A.2 – Tela de configuração dos transdutores do sistema.

Os parâmetros dos transdutores são:

- “*label*”, que é um identificador interno do programa de aquisição;
- “*type*”, que para esta tela assume automaticamente o valor “line”, ou seja, representa que os transdutores foram colocados para obtenção de dados fluidodinâmicos na linha (tubulações) de transporte;
- “*Identity*”, que identifica o transdutor, cada transdutor deve ter seu próprio número de “*Identity*” como modo de organizar e catalogar os mesmos;
- “*Length*”, que define o comprimento de tubulação até o respectivo

transdutor;

- “Position”, que representa a posição do ponto de tomada de pressão ao longo do transportador (0,1,2,3 e etc);
- “Physical Channel”, que deve corresponder ao canal físico em que o transdutor foi eletricamente conectado ao sistema de aquisição;
- “Volt to Pressure”, que define os parâmetros a e b da curva de calibração para obtenção da pressão a partir da voltagem ($a*(Volts)+b$);
- “Info”, que pode ser qualquer texto de carácter informativo escrito pelo usuário.

É importante ressaltar que “*type*” pode (versão 1.0) assumir duas condições: “*line*”, e “*Virtual*”. É possível definir o transdutor como “*Virtual*” no menu “*Transducers*”. Quando configurados dessa forma os dados obtidos serão na realidade números gerados randomicamente e não aquisição real. O objetivo é testar o programa na ausência de aquisição de dados reais.

Qualquer sistema de aquisição da *National Instruments*, que seja reconhecido pelo *MAX* (“*Measurement and automation*”) e possa utilizar o DAQmx como driver, terá suas entradas analógicas listadas em “*Physical Channel*”. Deste modo, o programa de aquisição pode ser utilizado com qualquer sistema de aquisição que respeite essas características.

A configuração inicial da tela da Figura A.2 será a mesma que a configuração armazenada como padrão (“*default*”) anteriormente. Ao fechar a tela no botão “*OK*” e tendo havido qualquer alteração em pelo menos um parâmetro de qualquer transdutor, o programa perguntará se deve salvar a configuração atual como sendo a padrão.

Através do menu (“*File*”) é possível salvar a configuração atual em arquivo do disco rígido, recuperar alguma configuração anteriormente armazenada ou verter a configuração padrão para a atual.

O botão “*Stop program*” para a execução do programa e o “*Start monitor*” inicia a aquisição de dados.

A Figura A.3 mostra a tela para aquisição de dados iniciada a partir do botão “*Start monitor*”. O usuário pode obter os resultados à qualquer momento

que desejar, ao clicar no botão “Take measurements”. O programa adquire os dados conforme configurado em “Sampling Rate – Steady” (da tela inicial do programa).

A média dos dados de pressão obtidos são colocadas automaticamente no gráfico “Last measurements”, em função de “Position” (ou “length”) do transdutor. Este gráfico acumula até 13 conjuntos de médias. A obtenção do décimo quarto conjunto de amostras limpa o gráfico e o re-inicia. É importante ressaltar que, apesar do gráfico ser reiniciado, os 13 primeiros conjuntos de dados não são perdidos. A re-iniciação do gráfico tem por objetivo apenas impedir a poluição visual durante a execução do programa.

Os dados de pressão em função do tempo de amostragem são colocados no gráfico “Waveform Graph”, mas apenas o último conjunto de dados obtido fica expresso no gráfico.

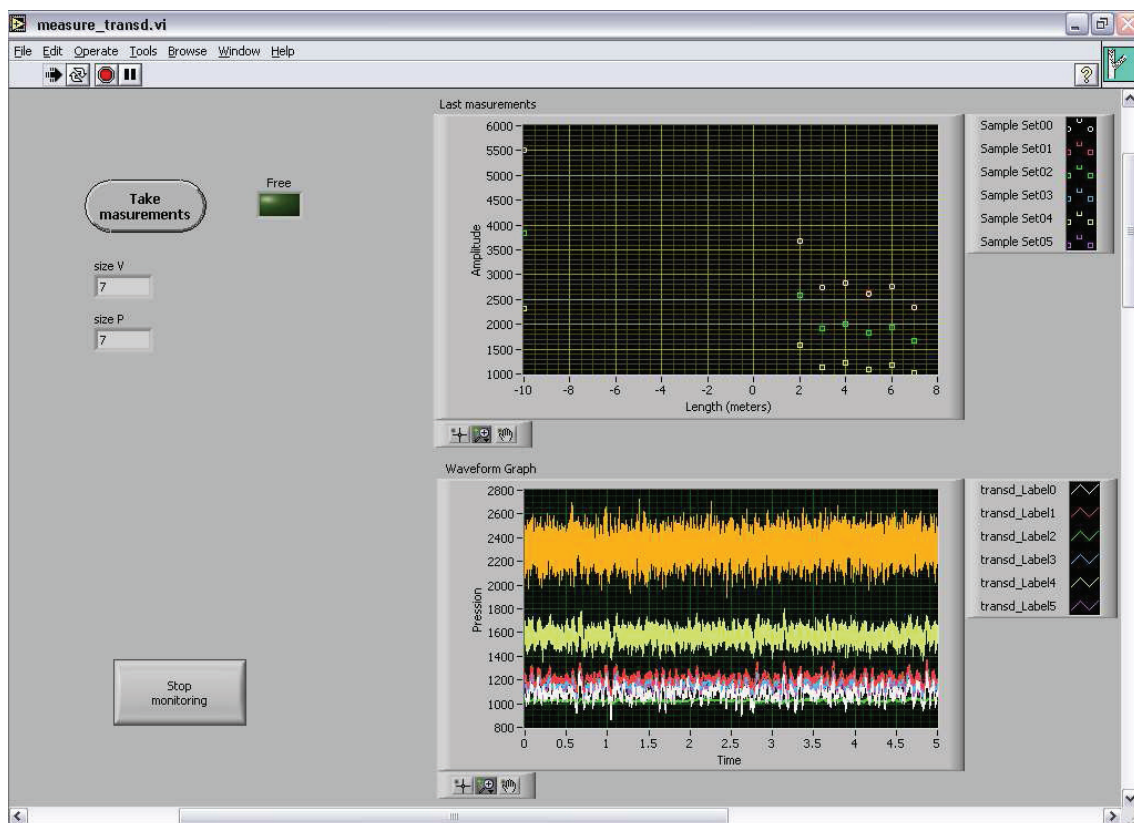


Figura A.3 - Tela para aquisição de dados.

O programa armazena quatro diferentes arquivos:

–“Log”, que contém as informações colocadas na tela inicial para

descrever o ensaio e parâmetros da aquisição (como número e tempo de cada amostragem);

– “Cond1”, que contém os dados de voltagem obtidos (formato *waveform* de armazenamento);

– “Cond1_Statist”, que armazena todos os dados tratados estatisticamente (média e desvio padrão);

– “2D_Pressure_Cond1”, que possui todos os dados obtidos de pressão em função do tempo (formato em caracteres ASCII).

Apêndice B – Cálculos das estatísticas para perda de pressão dos ensaios experimentais

Neste apêndice são apresentados resultados experimentais relacionados à perda de pressão no transportador pneumático nos ensaios experimentais com (Tabela B5 a B8) e sem material particulado (Tabela B1 a B4).

São apresentados a média ΔP , o desvio padrão amostral s de cada ΔP , o número de pontos experimentais obtidos (n) a cada t_i (associado à L). er representa o valor a ser somado ou subtraído de ΔP para obtenção do intervalo de confiança a 95% e $2\ er/\Delta P$ representa, portanto, o valor relativo percentual do intervalo de confiança frente a média.

Figura B.1 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio sem material particulado à 14m/s de velocidade nominal do ar.

14m/s (nominal) – sem particulado						
t_i	L (m)	ΔP (Pa)	er (Pa)	s (Pa)	n	$2er/\Delta P$ (%)
1	0	0				
2	0,262	-173,6	6,3	5,1	5	-7,26%
3	0,342	-164,5	5,5	4,4	5	-6,69%
4	0,442	-155,8	4,7	3,8	5	-6,06%
5	1,080	-176,7	65,0	26,2	3	-73,58%
7	2,580	-229,3	14,7	11,8	5	-12,83%
8	2,880	-242,2	26,2	16,5	4	-21,66%
9	3,180	-244,8	15,2	12,2	5	-12,42%
10	3,430	-273,2	20,8	8,4	3	-15,20%

Figura B.2 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio sem material particulado à 22m/s de velocidade nominal do ar.

22m/s (nominal) – sem particulado						
t_i	L (m)	ΔP (Pa)	er (Pa)	s (Pa)	n	$2\ er$ (%)
1	0	0				
2	0,262	-429,2	12,9	12,3	6	-6,02%
3	0,342	-402,0	11,9	11,4	6	-5,94%
4	0,442	-372,6	11,5	10,9	6	-6,16%
5	1,080	-448,9	9,1	3,6	3	-4,04%
7	2,580	-549,5	6,2	5,9	6	-2,26%
8	2,880	-566,0	17,0	10,7	4	-6,02%
9	3,180	-596,0	8,1	5,1	4	-2,71%
10	3,430	-643,7	54,6	34,3	4	-16,96%

Figura B.3 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio sem material particulado à 29,5m/s de velocidade nominal do ar.

29,5 m/s (nominal) – sem particulado						
ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-746,3	14,0	13,4	6	-3,76%
3	0,342	-690,5	10,9	10,4	6	-3,15%
4	0,442	-647,8	9,2	8,7	6	-2,83%
5	1,080	-776,6	8,9	3,6	3	-2,30%
7	2,580	-929,2	19,2	18,3	6	-4,13%
8	2,880	-987,2	18,4	17,6	6	-3,73%
9	3,180	-1011,6	2,5	1,0	3	-0,49%
10	3,430	-1082,2	75,0	71,5	6	-13,87%

Figura B.4 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio sem material particulado à 38m/s de velocidade nominal do ar.

38 m/s (nominal) – sem particulado						
ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-1304,7	32,4	30,9	6	-4,97%
3	0,342	-1166,5	27,0	25,7	6	-4,62%
4	0,442	-1107,5	27,3	26,0	6	-4,93%
5	1,080	-1320,0	60,4	24,3	3	-9,15%
7	2,580	-1570,5	44,7	28,1	4	-5,69%
8	2,880	-1606,7	49,2	30,9	4	-6,12%
9	3,180	-1669,1	42,2	26,5	4	-5,05%
10	3,430	-1923,8	79,5	32,0	3	-8,49%

Figura B.5 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio com material particulado à 14m/s de velocidade nominal do ar.

14 m/s (nominal) – com particulado						
ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-199,9	12,3	5,0	3	-12,33%
3	0,342	-192,0	11,5	4,6	3	-11,91%
4	0,442	-184,8	9,4	3,8	3	-10,22%
5	1,080	-248,0	25,0	10,0	3	-20,13%
6	1,580	-268,1	19,8	8,0	3	-14,77%
7	2,580	-301,9	16,4	6,6	3	-10,87%
8	2,880	-310,0	10,8	4,4	3	-7,00%
9	3,180	-334,9	18,6	7,5	3	-11,12%

Figura B.6 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio com material particulado à 22m/s de velocidade nominal do ar.

22 m/s (nominal) – com particulado						
ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-496,2	8,1	5,1	4	-3,25%
3	0,342	-478,1	7,7	4,8	4	-3,21%
4	0,442	-440,3	3,3	2,0	4	-1,48%
5	1,080	-539,1	3,5	2,2	4	-1,30%
6	1,580	-584,6	12,1	7,6	4	-4,16%
7	2,580	-653,0	5,9	3,7	4	-1,79%
8	2,880	-689,3	6,7	4,2	4	-1,94%
9	3,180	-722,9	6,1	3,8	4	-1,69%

Figura B.7 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio com material particulado à 29,5m/s de velocidade nominal do ar.

29,5 m/s (nominal) – com particulado						
Ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-975,0	24,9	20,0	5	-5,10%
3	0,342	-902,7	20,3	16,3	5	-4,50%
4	0,442	-818,7	15,2	12,2	5	-3,71%
5	1,080	-967,6	15,5	12,5	5	-3,20%
6	1,580	-1039,3	14,9	12,0	5	-2,87%
7	2,580	-1144,9	14,2	11,4	5	-2,47%
8	2,880	-1211,0	17,0	13,7	5	-2,81%
9	3,180	-1257,2	12,7	10,2	5	-2,01%

Figura B.8 – Resultados experimentais para perda de pressão do ensaio com material particulado a 38m/s de velocidade nominal do ar.

38 m/s (nominal) – com particulado						
ti	L (m)	ΔP (Pa)	er(Pa)	s (Pa)	n	2 er (%)
1	0	0				
2	0,262	-1561,4	44,4	27,9	4	-2,84%
3	0,342	-1412,1	40,4	25,4	4	-2,86%
4	0,442	-1293,7	36,3	22,8	4	-2,80%
5	1,080	-1514,1	59,6	24,0	3	-3,94%
6	1,580	-1609,4	31,8	20,0	4	-1,98%
7	2,580	-1767,5	41,4	26,0	4	-2,34%
8	2,880	-1874,1	44,7	28,1	4	-2,39%
9	3,180	-1931,6	50,0	31,4	4	-2,59%

Apêndice C – Infra-estrutura computacional

Quadro C.1 – Infra-estrutura computacional do centro de secagem utilizada para construção da tese.

Sistema operacional	Núcleos	Características principais
Windows 32 bits	4	Intel Core i7-920 2,66Ghz/4 4GB RAM
Windows 64 bits	4	Core2Quad 2,4Ghz/4 4GB RAM
Linux 64 bits	8	2 x Intel Xeon 3.0 Ghz 16 GB RAM Nvidia Quadro NVS 290