

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

ROBSON COSTA DE SOUSA

**ESTUDO FLUIDODINÂMICO E TÉRMICO NO TRANSPORTADOR
PNEUMÁTICO COM ALIMENTADOR TIPO JORRO**

São Carlos – SP
2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO FLUIDODINÂMICO E TÉRMICO NO TRANSPORTADOR
PNEUMÁTICO COM ALIMENTADOR TIPO JORRO**

Robson Costa de Sousa

Dissertação de mestrado 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 Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

São Carlos – SP
2009

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

S725ef

Sousa, Robson Costa de.

Estudo fluidodinâmico e térmico no transportador pneumático com alimentador tipo jorro / Robson Costa de Sousa. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

85 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Transporte por tubo pneumático. 2. Sistemas particulados. 3. Alimentador tipo jorro. 4. Fluidodinâmica. 5. Transferência de calor. 6. Secagem. I. Título.

CDD: 621.51 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **ROBSON COSTA DE SOUSA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 05 DE AGOSTO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Teixeira Freire
Orientador, PPG-EQ/UFSCar


Prof. Dr. José Romário Lima Verde
FEQ/UFU


Profª Drª. Maria do Carmo Ferreira
PPG-EQ/UFSCar

Achar que o mundo não tem um criador é o mesmo que afirmar que um dicionário é o resultado de uma explosão numa tipografia.

(Benjamin Franklin)

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.

(Leonardo da Vinci)

A persistência é o caminho do êxito.

(charles chaplin)

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha irmã e ao professor Freire.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desses dois anos de mestrado aprendi muito no Centro de Secagem. Este aprendizado contribuiu para a minha formação acadêmica e profissional. Isso só foi possível por que pude contar com o apoio de muitas pessoas que acreditaram em mim. Desta forma eu tenho a agradecer a:

- **Deus**

“Tudo posso naquele que me fortalece”. Todos os dias e sempre que posso agradeço a DEUS por estar vivo e por ter pessoas ao meu redor que me querem bem. Isto me faz querer viver sempre mais.

- **À minha família**

Aos meus pais Romil Pestana de Souza, Maria Eulália da Costa e minha irmã Roberta Costa de Souza que estiveram comigo sempre em todos os momentos da minha vida me dando apoio e amor.

- **Ao professor José Teixeira Freire**

Pela orientação e paciência durante esses anos, contribuindo para minha formação profissional e pessoal. Mais do que um professor ! Eu o considero como o maior educador que já conheci pela forma de como leciona e expõe o amor que tem a sua família, alunos e amigos.

- **À professora Maria do Carmo Ferreira**

Pela paciência e dedicação em me ajudar todas as vezes que estive em sua sala, contribuindo bastante para a realização do trabalho.

- **Aos professores: Demerval Sartori, Ana Maria Silveira e Ronaldo Correa**

Pelas sugestões e críticas construtivas durante os seminários de área. Além disso, por fazer parte dos momentos felizes pelos quais passei no Centro de Secagem e pela admiração que tenho a vocês.

- **Aos “BROTHERS” do Centro de Secagem**

Aos bons momentos e o companheirismo de: Renata de Aquino, Bruna de Souza, André Ricardo Felkl, Lucas Meili, Cesar da Rosa, Rodrigo Bettega, Cibele de Souza, Leonardo Arrieche e Hugo Perazzini. Sem esquecer os técnicos Oscar, Adilson e Edilson que contribuíram auxiliando na montagem e manutenção do equipamento.

- **Turma da Pós-Graduação**

Aos momentos divertidos nos almoços de finais de semana. Isso só foi possível devido a presença de: Eduardo Tanabe, Gian Braune, Renata de Aquino, Bruna de Souza, Eduardo Baston, Rodrigo Bettega, Letícia, André Maranhão, Alexandre Bôscaro, Lucas Meili e Eduardo Baston.

- **República**

Aos bons momentos vívidos e presenciados pelos colegas da república: Marcelo Pereira, Gustavo Ciniciato, Jayme Proni, Alexandre Bôscaro e Márcio Rotondo.

- **Sem esquecer o ES**

Aos meus queridos professores da graduação: Marcos Roberto Teixeira Halasz, Marcelo Guilherme Guida Mazza, Flavia Pereira Puget, Waldir Lopes e Giussepi Camilleti. Por me motivarem a vida acadêmica. Vocês são bons exemplos de seres humanos e profissionais.

As pessoas que me deram apoio moral ao longo desses anos: Sabrina Gadioli, Daniel Dias (meu primo-irmão), Ícaro Pianca, Luciano Perini, Fabrycio Crizóstomo, Ricardo Malacarne, Josiana Laporti e Aparecida Favarato.

- **Apoio financeiro**

Ao CNPq pelo auxílio à pesquisa.

RESUMO

O transportador pneumático com alimentador tipo jorro vem sendo estudado ao longo dos anos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar. Dentro do contexto de informações sobre este tipo de transportador, existem na literatura estudos que tiveram como foco analisar seu comportamento fluidodinâmico, os quais podem ser encontrados nos trabalhos de Ferreira (1991); Ferreira e Freire (1992); Ferreira (1996); Silva (1997) e Costa (2001). O presente trabalho teve como objetivos: (i) analisar o comportamento fluidodinâmico a partir de um estudo experimental no escoamento gás-sólido nos regimes denso e diluído, avaliando a influência da distância entre a base do alimentador tipo jorro e a entrada do tubo de transporte, denominada de z_0 ; (ii) realizar a verificação de um modelo encontrado na literatura, o modelo proposto por Zorana *et al.* (2004) para descrever os perfis de pressão, porosidade e velocidade dos sólidos no tubo de transporte, e (iii) analisar a influência da temperatura do ar de entrada no comportamento fluidodinâmico, térmico e na evaporação da água. Na realização deste trabalho foram utilizadas esferas de vidro como partículas inertes com densidade igual a 2500 kg/m^3 e diâmetro médio de 2,7 mm. Para os ensaios de evaporação foi usada a água considerada como suspensão “ideal”. Os dados foram obtidos utilizando-se de um sistema de aquisição de dados da marca LYNX constituído por uma placa condicionadora de sinais e uma placa de aquisição de dados. Para a visualização das medidas foi utilizada uma rotina desenvolvida usando o software LabView, o qual forneceu a média e o desvio padrão dos dados de pressão e vazão mássica do ar de entrada. Analisando os dados obtidos de vazão de sólidos, da pressão estática e dos gradientes de pressão foi possível observar que o comportamento fluidodinâmico foi influenciado pelos diferentes z_0 utilizados (5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 cm). A análise dos dados de gradiente de pressão em função da velocidade superficial do ar permitiu identificar os regimes de escoamento denso e diluído. Os resultados simulados mostraram que o modelo foi capaz de prever satisfatoriamente o comportamento

fluidodinâmico para as condições de entrada utilizadas. Em relação à transferência de calor os resultados mostraram que para a faixa de temperatura do ar investigada a influência não é significativa, pois foram apresentados comportamentos fluidodinâmicos e térmicos semelhantes para ambas as temperaturas, 80 e 100°C. No caso da evaporação da água foram observados maiores potenciais de evaporação para a maior temperatura do ar de entrada.

ABSTRACT

The pneumatic conveyor using a spouted bed as a particle feeding method has been studied in the past years in the Centro de Secagem/DEQ/UFSCar. In the literature there are some studies related to the fluid dynamics behavior of this type of conveyor, which can be found in the following works: Ferreira (1991); Ferreira e Freire (1992); Ferreira (1996), Silva (1997) e Costa, (2001). The aim of this work is: (i) to analyze the fluid dynamics behavior through experimental data obtained for the gas-solid flow in the dense and dilute phase and also, to evaluate the influence of the distance between the inlet of the contactor and the entrance of the conveyor pipe (z_0); (ii) to apply the model developed by Zorana *et al.* (2004) for predicting the pressure, voidage, gas and solids velocity profiles, and compare the simulated and experimental results; (iii) to analyze the influence of the inlet temperature in the fluid dynamics, heat transfer and water evaporation behaviors. In this work glass beads with $d_p = 2.7$ mm and $\rho_p = 2500$ kg/m³ were used as a particulate phase. In the drying experiments water was used as an ideal suspension. The average and the standard deviation of the experimental variables were acquired using a LYNX data acquisition system and a routine made in the LabView software. It was possible to verify that the different z_0 (5.0, 5.5, 6.0 e 6.5 cm) studied here influenced significantly the fluid dynamic behavior. Also, the dense and dilute regimes were identified by analyzing the experimental pressure gradients. The model used in this work was able to predict the experimental data satisfactorily. Although a significant influence of the air inlet temperature in the fluid dynamics and heat transfer behaviors was not observed in the range (80 and 100 °C) studied here, it does affect the water evaporation rate, which was higher for the highest temperature.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
SUMÁRIO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS.....	x
NOMENCLATURA	xi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Transporte Pneumático	4
2.2. Gradiente de Pressão e Regime de Escoamento	7
2.2.1. Gradientes de pressão	7
2.2.2. Regimes de escoamento.....	8
2.3. Transportador Pneumático com Alimentador de Partículas Tipo Jorro	13
2.3.1. Fluidodinâmica	14
2.3.2. Transferência de calor	17
2.4. Modelagem Matemática	19
2.4.1. Forças de atrito com a parede e força de arraste fluido-partícula.....	20
2.4.2. Coeficiente de atrito fluido-parede, partícula-parede e de arraste.....	21
2.5. Secagem.....	25
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1. Materiais	27
3.2. Equipamento	27
3.3. Procedimento Experimental	34
3.3.1. Análise fluidodinâmica.....	34
3.3.2. Análise da evaporação da água.....	36
3.4. Modelagem Matemática da Fluidodinâmica	37

3.4.1 Parâmetros fluidodinâmicos	40
3.4.2 Condições de contorno	41
3.4.3. Solução do sistema de equações diferenciais	42
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Análise Fluidodinâmica	44
4.1.1. Curvas características	44
4.1.2. Vazão de sólidos	46
4.1.3. Pressão estática	48
4.1.4. Gradiente de pressão	52
4.2. Resultados Simulados	55
4.3. Análise Térmica	61
4.3.1. Curvas características em função da temperatura	62
4.3.2. Porosidade média	63
4.3.3. Temperatura do ar	64
4.4. Evaporação da Água	66
4.4.1. Análise dos dados de pressão	67
4.4.2. Análise dos dados de temperatura do ar	68
4.4.3. Umidade relativa do ar	71
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	74
5.1. Análise Fluidodinâmica	74
5.2. Simulação da Fluidodinâmica	75
5.3. Análise Térmica	76
5.4. Evaporação da Água	76
5.5. Sugestões	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXO A	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de queda de pressão em função da velocidade do gás (Marcus <i>et al.</i> , 1990).....	10
Figura 2.2: Curva característica da pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para o escoamento em fase diluída (Marcus <i>et al.</i> , 1990).	13
Figura 2.3: Queda de pressão em função da vazão de ar. Esferas de vidro, $d_p = 2.8$ mm; $z_0 = 5,0$ cm e $T = 80^\circ\text{C}$ (Ferreira, 1991).	14
Figura 2.4: Vazão dos sólidos em função da vazão volumétrica do ar para diferentes z_0 (Ferreira, 1991).....	15
Figura 2.5: Temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para esferas de vidro (Narimatsu, 2004).....	19
Figura 3.1: Diagrama esquemático do transportador pneumático com alimentador tipo jorro.	28
Figura 3.2: Diagrama esquemático do alimentador tipo jorro.....	29
Figura 3.3: Esquema do bocal redutor localizado na entrada de ar.	30
Figura 3.4: Esquema da caixa de amostragem de sólidos (Costa, 2001).....	31
Figura 3.5: Modelo da válvula guilhotina instalada no equipamento (Costa, 2001).....	32
Figura 3.6: Esquema do sistema de alimentação da suspensão no interior do alimentador tipo jorro.	33
Figura 3.7: Esquema do termopar com proteção (Narimatsu, 2004).....	34
Figura 3.8: Diagrama esquemático da região de alimentação (Região 1) e a região do tubo de transporte (Região 2).	38
Figura 3.9: Diagrama esquemático da geometria que envolve a região de alimentação dos sólidos.....	39
Figura 4.1: Queda de pressão em função da velocidade do ar para: a) $z_0 = 5,0$; b) $z_0 = 5,5$; c) $z_0 = 6,0$ e d) $z_0 = 6,5$ cm.	45
Figura 4.2: Vazão de sólidos em função da velocidade do ar parametrizado em z_0	47
Figura 4.3: Pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para: a) $z_0 = 5,0$; b) $z_0 = 5,5$; c) $z_0 = 6,0$ e d) $z_0 = 6,5$ cm.	50
Figura 4.4: Gradiente de pressão em função da velocidade do parametrizado em z_0	53
Figura 4.5: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a $0,039$ m^3/s	55

Figura 4.6: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a 0,045 m ³ /s.....	56
Figura 4.7: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a 0,052 m ³ /s.....	56
Figura 4.8: Diagramas esquemáticos do comportamento apresentado na região da entrada do tubo de transporte, a) dados experimentais e b) resultados simulados.....	57
Figura 4.9: Resultados simulados e valores médios experimentais de porosidade no tubo de transporte em função da altura do tubo de transporte para as condições de operação iguais a: a) 0,039 m ³ /s; b) 0,045 m ³ /s e c) 0,052 m ³ /s.	59
Figura 4.10: Resultados simulados da velocidade dos sólidos em função comprimento do tubo de transporte.	60
Figura 4.11: Queda de pressão em função da velocidade do ar a temperatura de 80 e 100°C do equipamento operando a) vazio e b) com sólidos.	62
Figura 4.12: Temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para as velocidades utilizadas a: a) 80°C e b) 100°C	65
Figura 4.13: Adimensionais de pressão na entrada do equipamento em função do tempo parametrizada na vazão de alimentação para as temperaturas: a) 100°C e b) 120°.	67
Figura 4.14: Pressão estática ao longo do tubo de transporte parametrizado nas vazões de alimentação à velocidade do ar de 72,0 m/s e temperatura do ar de entrada: a) 100°C e b) 120°C.	68
Figura 4.15: Temperatura do ar em função do tempo ao longo do tubo de transporte para temperatura do ar de entrada de 100°C e nas vazões de alimentação de: a) 20 ml/min e b) 70 ml/min.....	69
Figura 4.16: Temperatura do ar em função do tempo ao longo do tubo de transporte para temperatura do ar de entrada de 120°C e nas vazões de alimentação: a) 20 ml/min e b) 70 ml/min.....	71
Figura 4.17: Umidade relativa do ar em função do tempo parametrizada na vazão de alimentação a temperatura a) 100°C e b) 120°C.....	72

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1: Correlações para determinação do coeficiente de atrito para tubos lisos.....	22
Quadro 2.2: Correlações para determinação do coeficiente partícula-parede.....	22
Quadro 2.3: Correlações para a estimativa do coeficiente de arraste.....	23
Quadro 3.1: Parâmetros fluidodinâmicos utilizados no modelo.	41
Tabela 4.1: Valores máximos de queda de pressão para cada z_0 utilizado.....	46
Tabela 4.2: Valores de $-dP/dZ_{\min}$ e U_{\min}	54
Tabela 4.3: Porosidade média em função da velocidade do ar para as temperaturas do ar de entrada iguais a 80 e 100°C.	63

NOMENCLATURA

A	Área da secção transversal do tubo de transporte	$[L^2]$
Cd	Coefficiente de arraste efetivo no transporte pneumático	$[-]$
c_s	Velocidade superficial da partícula no tubo de transporte	$[LT^{-1}]$
d_p	Diâmetro médio da partícula	$[L]$
$d(z_1)$	Diâmetro na coordenada z da região 1	$[L]$
$-dP/dZ$	Gradiente de pressão por unidade de comprimento na direção z	$[ML^{-2}T^{-2}]$
$-dP/dZ_{\min}$	Mínimo gradiente de pressão por unidade de comprimento	$[ML^{-2}T^{-2}]$
D_t	Diâmetro do tubo	$[L]$
f_f	Coefficiente de atrito fluido-parede	$[-]$
f_p	Coefficiente de atrito partícula -parede	$[-]$
F_d	Força de arraste entre as fases fluida e sólida por unidade de volume de suspensão	$[ML^{-2}T^{-2}]$
F_f	Força de atrito fluido-parede por unidade de comprimento	$[ML^{-2}T^{-2}]$
F_p	Força de atrito partícula - parede por unidade de comprimento	$[ML^{-2}T^{-2}]$
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
G_f	Vazão mássica de gás no tubo de transporte	$[MT^{-1}]$
G_p	Vazão mássica da partícula no tubo de transporte	$[MT^{-1}]$
L	Comprimento do tubo de transporte	$[L]$
P	Pressão estática	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Q	Vazão mássica do ar	$[MT^{-1}]$
Re	Número de Reynolds definido como sendo igual a uD_t/μ	$[-]$
T	Temperatura	$[\Theta]$
u	Velocidade intersticial do fluido	$[LT^{-1}]$
u_c	Velocidade de “choking”	$[LT^{-1}]$
U	Velocidade superficial do ar	$[LT^{-1}]$
U_{\min}	Velocidade de mínimo gradiente de pressão	$[LT^{-1}]$
UR	Umidade relativa definida como sendo igual a $(UR = UR_{\text{tempo}} - UR_{\text{inicial}})$	$[-]$
v	Velocidade das partículas	$[LT^{-1}]$
V_p	Volume das partículas	$[L^3]$
V_T	Volume total de secção do tubo de transporte entre as guilhotinas	$[L^3]$
W_s	Vazão mássica dos sólidos	$[MT^{-1}]$
z_0	Distância entre a entrada da base do alimentador e a entrada do tubo de transporte	$[L]$
ΔH	Queda de pressão manométrica por unidade de comprimento	$[ML^{-2}T^{-2}]$

ΔP	Queda de pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
------------	------------------	-------------------

SÍMBOLOS GREGOS

β	Coeficiente de arraste da interface fluído-partícula	$[ML^{-4}]$
ε	Porosidade	$[-]$
θ	Ângulo da base cônica	$[-]$
μ	Viscosidade do fluido	$[ML^{-1}T^{-1}]$
ρ	Densidade	$[ML^{-3}]$

SUB-ÍNDICES

atm	Atmosférica
<i>f</i>	Fluido
<i>mf</i>	Mínima fluidização
<i>p</i>	Partícula
sim	simulado
t	Tubo de transporte
T	Total
0	Inicial

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O transporte pneumático é uma operação unitária de grande importância nas indústrias químicas, farmacêuticas e alimentícias. Este sistema apresenta como vantagens a possibilidade do transporte de uma enorme variedade de produtos, baixo custo de manutenção, fácil operação, excelente contato entre as fases gás-sólido e altas taxas de transferência de calor (Klinzing *et al.* 1987). Devido a isso, inúmeros são os processos nos quais o transporte pneumático pode ser aplicado, dentre eles os que mais se destacam são a secagem e o craqueamento catalítico (Pécora, 1985).

No transportador pneumático o mecanismo de transporte envolvido baseia-se no deslocamento de materiais particulados no interior de tubulações horizontais ou verticais por meio de uma corrente gasosa. É essencialmente constituído de quatro etapas: suprimento de energia; sistema de alimentação; linha de transporte, e sistema de separação. Dentre estas etapas o sistema de alimentação é o mais importante, pois está relacionado com a estabilidade operacional, além de interferir na viabilidade técnica, econômica e na eficiência do equipamento (Feltran, 2005). Existem na literatura vários tipos de alimentadores, sendo que os mais utilizados são: alimentador gravitacional; rosca sem fim; válvulas “L” ou “J”; leito fluidizado, e o leito de jorro.

No Centro de Secagem do DEQ/UFSCar na década de 90 foi desenvolvido um transportador pneumático com alimentador tipo jorro. Esse equipamento é constituído de um alimentador tipo jorro, de um tubo de transporte, de uma câmara de desaceleração e de um tubo de reciclo. Esta configuração faz com que haja semelhanças com o leito de jorro com tubo interno.

Dentro do contexto de informações sobre o transportador pneumático com alimentador tipo jorro, existem na literatura estudos que tiveram como foco a análise do

comportamento fluidodinâmico, que podem ser encontrados nos trabalhos de Ferreira (1991); Ferreira e Freire (1992); Ferreira (1996); Silva (1997) e Costa (2001). Apesar de uma grande quantidade de informações sobre a sua fluidodinâmica, ainda existem poucas averiguações sobre os fenômenos de transferência de calor e massa neste sistema. Um trabalho comparativo com este tipo de transportador, porém com sistema de alimentação diferente foi realizado por Narimatsu (2004), o qual avaliou a transferência de calor no escoamento gás-sólido.

Visando dar continuidade aos estudos já realizados no Centro de Secagem estruturou-se um trabalho experimental tendo como objetivo principal analisar o comportamento fluidodinâmico no escoamento gás-sólido nos regimes denso e diluído, avaliando a influência da distância entre a entrada da base do alimentador e a entrada do tubo de transporte, denominada de z_0 . Para isso, foram obtidos dados de vazão de sólidos, pressão estática e gradientes de pressão. Também foi realizada a verificação de um modelo proposto por Zorana *et al.* (2004). Um segundo objetivo está associado ao comportamento térmico do sistema a partir de um estudo experimental. Esse envolveu a análise da influência da temperatura do ar de entrada no comportamento fluidodinâmico, térmico e na evaporação da água. Para atingir os objetivos propostos foram realizadas as seguintes etapas:

- obtenção dos dados de vazão de sólidos;
- obtenção de perfis axiais da pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte;
- obtenção de gradientes de pressão em função da velocidade do ar;
- utilização do modelo proposto por Zorana *et al.* (2004);
- obtenção dos dados simulados de pressão estática, porosidade e velocidade dos sólidos;
- análise das curvas características do leito nas temperaturas de 80 e 100°C;
- obtenção da porosidade média no tubo de transporte;

-
- obtenção de perfis axiais de temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para diferentes condições operacionais;
 - obtenção dos dados de pressão na entrada do equipamento e no tubo de transporte na presença da fase líquida;
 - obtenção dos dados de temperatura do ar em função das vazões de alimentação utilizadas na evaporação da água, e
 - análise das curvas de umidade relativa do ar em função do tempo parametrizados nas vazões de alimentação no processo de evaporação da água.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente é apresentado neste capítulo uma abordagem sobre o transporte pneumático, a queda de pressão e o regime de escoamento. Em seguida a revisão foi realizada de maneira mais específica buscando detalhar as contribuições de estudos diretamente associados ao transportador pneumático com alimentador tipo jorro. Por fim, são apresentadas informações sobre a modelagem matemática e a secagem.

2.1. Transporte Pneumático

O transporte pneumático é uma operação unitária no qual materiais sólidos são transportados através de tubulações por meio de uma corrente gasosa. Segundo Marcus *et al.* (1990) a utilização desta operação é antiga, sendo que o primeiro registro de transporte de sólidos em uma corrente de ar fornecido por meio de ventiladores foi em 1866. Já as primeiras aplicações em larga escala, são datadas no final do século XIX com o transporte de grãos por sistema a vácuo.

Em meados da década de 20 a utilização deste sistema tornou-se bastante comum. Atualmente, são aplicados nos mais diversificados ramos das indústrias: químicas (craqueamento catalítico, combustão, produção de propileno); alimentícias (transporte de materiais como arroz, café, açúcar), e farmacêuticas (Marcus *et al.*, 1990).

As diversas aplicações do transporte pneumático no campo industrial devem-se as vantagens que este sistema pode oferecer como: versatilidade no transporte de diferentes materiais indo desde sólidos em pó até peças de materiais manufaturados, transporte limpo e isento de perdas de material; distribuição e captação de material de diferentes áreas num mesmo sistema; baixo custo de manutenção; fácil operação e excelente contato entre as fases gás-sólido (Marcus *et al.*, 1990). Além disso, as altas taxas de transferência de calor neste

sistema favorecem a secagem convectiva (Baeyens *et al.*, 1995). Devido a isso, são encontrados na literatura alguns trabalhos que utilizaram este equipamento para a secagem de materiais como o bagaço de cana (Nebra, 1985), arroz (Pelegrina, 2001 e Bunyawanchakul, 2007); etc. Entretanto, a aplicação destes sistemas pode apresentar algumas desvantagens, como alto consumo energético, grande abrasividade nas tubulações e no material e a limitação de distância para o transporte do material (Marcus *et al.*, 1990).

Segundo Marcus *et al.* (1990) o processo de funcionamento envolvido nos sistemas de transporte pneumático é essencialmente constituído por quatro etapas, comumente denominadas de alimentação de gás, alimentação de sólidos, linha de transporte e separação de sólidos. A etapa de alimentação de gás é essencial nos sistemas de transporte pneumático, pois tem como finalidade fornecer a energia para realizar o deslocamento do material através da tubulação. Segundo Lopes (2007), esta etapa está fortemente ligada ao custo operacional dos transportadores, uma vez que, quanto maior a perda de carga gerada, maior deve ser a potência fornecida ao sistema. Os equipamentos utilizados nesta etapa são: sopradores, compressores, ventiladores ou bombas a vácuo. Na alimentação de sólidos ocorre a mistura das fases gás-sólido, o que implica na troca de quantidade de movimento entre elas. Devido a isto, esta etapa é considerada de fundamental importância, pois está diretamente relacionada com a flexibilidade e viabilidade econômica dos transportadores pneumáticos (Marcus *et al.*, 1990).

Na literatura existem diversos tipos de alimentadores que já foram aplicados em transportadores pneumáticos, dentre os quais cabe citar o gravitacional (Capes e Nakamura, 1973; Narimatsu, 2004), a válvula “L” ou “J” (Feltran, 2005), o parafuso sem fim (Silva, 1997), o leito de jorro (Ferreira e Freire, 1992; Costa, 2001) e o leito fluidizado (Grbavic *et al.*, 1992; Kim *et al.*, 2004). Os alimentadores são divididos em duas categorias, os alimentadores independentes da vazão de gás, conhecido como alimentadores mecânicos

(rosca sem fim, gravitacional, válvula rotativa, válvula gaveta) e os dependentes da vazão de gás, denominados como alimentadores não-mecânicos (válvula “L” ou “J”, Venturi, tipo jorro). Segundo Álvares (1997) os alimentadores mecânicos estão cada vez mais cedendo espaço aos sistemas não-mecânicos devido aos problemas de desgaste e travamento, dificuldades de operação em condições de elevada pressão, e temperatura e um alto custo de operação e manutenção. Além disto, são mais flexíveis, por não possuírem partes móveis e serem mais baratos (Lopes, 2007).

Após a mistura, o gás e os sólidos, entram na zona de transporte que é formada pela tubulação propriamente dita. Cabe ressaltar que a escolha da tubulação deve levar em conta a abrasividade do produto, pressão do sistema e a capacidade de transporte. A secção de transporte pode adquirir diferentes configurações dependendo da utilização (Marcus *et al.*, 1990). Segundo Silva (1997), as linhas de transporte pneumático podem ser inclinadas (Lim, 2006), horizontais (Woods, 2008), verticais (Rautiainen, 1999) ou até mesmo mista, ou seja, conciliar estas formas (Lopes, 2007).

De acordo com Lopes (2007) a flexibilidade de percurso só é possível quando são introduzidas curvas na tubulação de transporte causando a mudança da direção do escoamento. Entretanto, a presença destas curvas pode afetar a estrutura do escoamento gás-sólido, aumentando a queda de pressão. Além disso, pode causar problema de corrosão por erosão e impigimento. Na literatura são encontrados trabalhos que abordam com mais detalhes este assunto, dentre o quais destacam-se os trabalhos de Shallert e Levy (2000); Kalman (2000) e Akilli *et al.* (2001).

Depois de transportada, a mistura gás-sólido passa por um processo de separação dos sólidos da corrente gasosa. Nesta etapa os equipamentos mais utilizados são os ciclones e os filtros manga. Segundo Lopes (2007), a seleção do tipo de equipamento mais

adequado para um dado sistema depende de muitos fatores, como o tamanho da partícula, a eficiência de coleta e o potencial poluente dos sólidos.

2.2. Gradiente de Pressão e Regime de Escoamento

A estimativa do gradiente de pressão e do regime de escoamento a partir de variáveis conhecidas como vazão do gás e dos sólidos, porosidade, diâmetro do tubo e características das partículas sólidas são essenciais para o dimensionamento dos transportadores pneumáticos verticais. Por exemplo, a escolha do soprador adequado é realizada conhecendo-se a velocidade necessária para transportar o material. Esta é obtida a partir da queda de pressão, necessária para assegurar o transporte. No que se refere ao regime de escoamento muitos transportadores pneumáticos necessitam trabalhar no regime diluído devido ao tipo de material que está sendo transportado, sendo necessário conhecer primeiramente o regime que será estabelecido para uma determinada condição de operação.

2.2.1. Gradientes de pressão

O gradiente de pressão por unidade de comprimento pode ser estimado através de correlações empíricas, modelos fenomenológicos advindos de balanço de quantidade de movimento ou ainda a partir de diagramas obtidos experimentalmente.

Utilizando-se de correlações empíricas, alguns autores como Leung e Wiles (1976) e Khan e Pei (1973) apresentaram métodos de cálculos baseados em correlações de natureza empírica ou de extensões da equação de Ergun (1952). Exemplos destas correlações podem ser encontrados nos trabalhos de Zens (1949), Stemerding (1962) e Capes e Nakamura (1973). Em relação aos modelos, uma formulação comumente utilizada foi proposta por

Capes e Nakamura (1973). Este modelo é constituído por equações diferenciais da continuidade e de quantidade de movimento para as fases fluida e sólida.

Por fim, os gradientes de pressão podem ser obtidos a partir de regressão linear dos dados experimentais de pressão estática em função da posição axial do tubo de transporte fora da região de aceleração. A partir disso, são obtidos os valores de gradiente de pressão que na grande maioria dos casos são utilizados para construir o diagrama similar ao proposto por Zens (1949), de dP/dZ em função de U . Diagrama como este foi utilizado por Silva (1997) e Costa (2001) para analisar o regime de escoamento.

Uma das dificuldades em se obter uma formulação geral para estimar o gradiente de pressão é a existência de vários regimes de escoamento que dependem principalmente da faixa de vazão de ar utilizada para o fluido e o sólido.

2.2.2. Regimes de escoamento

Segundo Marcus *et al.* (1990) uma das formas de classificar o escoamento de um sistema gás-sólido é conhecendo-se a concentração média dos sólidos na tubulação. Desta forma podem ser identificados dois tipos de regimes de escoamento: em fase densa ou em fase diluída.

De acordo com Leung e Wiles (1976) quando a vazão do gás é suficiente apenas para transportar os sólidos a baixas concentrações volumétricas, geralmente abaixo de 5%, tem-se o regime em fase diluída. A fase diluída apresenta como características, uma concentração uniforme de sólidos durante o escoamento gás-sólido com porosidade acima de 0,97 e uma variação na queda de pressão promovida principalmente devido ao atrito entre o fluido e a parede do tubo de transporte.

No regime em fase densa a vazão do gás é baixa e as partículas movem-se em blocos com concentrações acima de 5%. A fase densa caracteriza-se por altas concentrações de sólidos e valores de porosidade menores que 0,75 (Freire *et al.*, 1993). Porém este tipo de escoamento é mais complexo devido às formas de como ocorre o transporte. Segundo Capes e Nakamura (1973), nesta fase pode ocorrer o transporte das partículas na forma de pulsos, denominada de fase densa com “slugging” ou o transporte dos sólidos pela região central do tubo e recirculação de uma quantidade de partículas adjacentes à parede do tubo. Isto faz com que o transporte em fase densa seja mais difícil de ser analisado quando comparado com a fase diluída.

A transição da fase diluída para a fase densa pode ocorrer de forma brusca e instável, denominada de “choking”. Neste caso, o transporte de uma suspensão diluída dará lugar ao transporte de uma suspensão com maior concentração de sólidos, sendo transportadas na forma de pulsos. Na grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura, o “choking” é identificado através da determinação da velocidade de “choking” (u_c), a qual é utilizada para definir a velocidade mínima de transporte estável num transportador pneumático (Marcus *et al.*, 1990). Esta velocidade é comumente obtida através de correlações empíricas (Yousfi e Gau, 1974; Yang, 1977).

Marcus *et al.* (1990) analisaram as principais equações para u_c e observaram que a correlação de Yang (1977) é a mais consistente. Informações mais detalhadas sobre o fenômeno de “choking” podem ser encontradas também nos trabalhos de Konrad, (1986), Marcus *et al.* (1990) e Bi *et al.* (1993). Segundo Costa, (2001) a demarcação do regime de “choking” não é uma tarefa fácil, em virtude disto são encontradas na literatura um grande número de definições que são discutidas, por exemplo, nos trabalhos de Yerushalmi e Canckurt (1976) e Chong e Leung (1986).

Além do uso das correlações apresentadas para a previsão do tipo de escoamento, algumas técnicas experimentais podem ser utilizadas. Uma delas é a construção de gráficos de gradiente de pressão no leito ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial do gás para uma vazão de sólidos fixa (W_s), conforme mostrado na Figura 2.1.

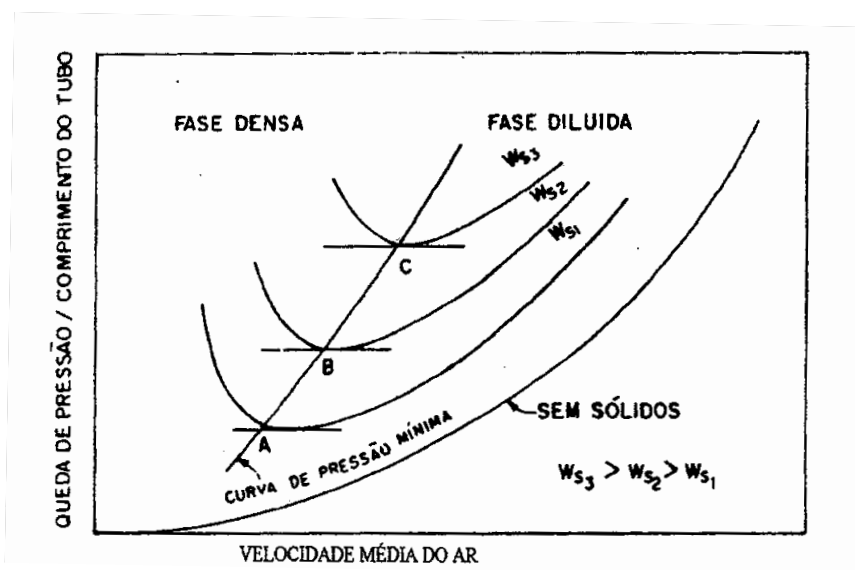


Figura 2.1: Diagrama de queda de pressão em função da velocidade do gás (Marcus *et al.*, 1990).

Esta figura permite identificar os regimes de escoamento denso e diluído, a partir do menor valor de gradiente de pressão a uma vazão de sólidos constante, representados pelas letras A, B e C na Figura 2.1. Estes valores de gradiente de pressão são conhecidos como mínimo gradiente de pressão e são utilizados para delimitar os dois regimes, sendo que do lado direito encontra-se o regime diluído e a esquerda o regime de fase densa. Cabe ressaltar que este é apenas um dos métodos de identificação de regime de escoamento, assim como inúmeras correlações existentes na literatura que não serão apresentadas neste trabalho por não ser este o foco principal do estudo.

Marcus *et al* (1990) apresentaram um diagrama de gradiente de pressão em função da velocidade do ar, o qual pode-se visualizar a transição entre as fases densa e diluída

no transporte pneumático. Os autores observaram que o limite entre as regiões de fase densa e fase diluída varia de acordo com a vazão de sólidos e com a velocidade superficial do gás. Dessa forma, a partir da fase diluída, chega-se a esse limite com a diminuição da velocidade do gás, ou aumentando-se a vazão de sólidos a uma vazão de gás constante.

Grbavic *et al.* (1997) desenvolveram uma metodologia para prever a velocidade de “choking” e a porosidade no transportador pneumático com alimentador tipo jorro. Nesse trabalho foram utilizadas esferas de vidro com diâmetro de 1,20; 1,94 e 2,98 mm. Os autores analisaram as velocidades de “choking” a partir de gráficos de gradiente de pressão em função da velocidade do ar, obtidos teoricamente e experimentalmente. No caso dos gráficos de gradiente de pressão obtidos experimentalmente os autores identificaram os pontos de mínimos que correspondiam a velocidade do ar em que ocorria a transição das regiões da fase densa para a diluída.

Silva (1997) analisou o escoamento gás-sólido do regime denso e diluído em um transportador pneumático com alimentador tipo jorro. O escoamento foi analisado utilizando gráficos de gradiente de pressão em função da velocidade do ar para valores de z_0 iguais a 4,0; 5,0; 6,0 cm. O autor observou uma dependência dos valores de mínimo gradiente de pressão com o aumento de z_0 e concluiu que foi possível identificar o regime de escoamento adotando-se esses valores como o ponto de transição entre os regimes.

Rautiainen *et al.* (1999) realizaram um estudo teórico e experimental para descrever o escoamento gás-sólido no transporte pneumático vertical. Os autores utilizaram os gráficos de gradiente de pressão para analisar o atrito na queda de pressão total. Foram obtidas curvas de gradiente de pressão em função da velocidade do ar para cada vazão de alimentação, as quais eram mantidas constantes. Apesar dos autores não terem identificado a transição do escoamento denso para o diluído as curvas apresentaram comportamentos

qualitativos iguais às curvas descritas por Zens (1949) utilizadas para análise do escoamento do regime denso e diluído.

Costa *et al.* (2004) analisaram o regime de escoamento. Nesta análise foram obtidos dados de vazão de sólidos, porosidade e gradiente de pressão, todos em função da velocidade do ar para diferentes diâmetros de tubo e partícula. Para os gráficos de gradiente de pressão, os autores observaram que para todos os diâmetros de tubo analisados as curvas apresentaram pontos de mínimos, os quais foram utilizados para identificar as regiões dos escoamentos denso ou diluído.

Das *et al.* (2008) analisaram os escoamentos denso e diluído em um “riser” de um leito fluidizado circulante, utilizando uma mistura de catalisador de FCC, carvão e minério de ferro. O equipamento possuía vinte e uma tomadas para medida de pressão, das quais oito encontravam-se no reciclo e treze no “riser”. Usando estas medidas os autores caracterizaram as transições entre os regimes de escoamento. Gráficos de gradiente de pressão em função da velocidade do ar foram usados para identificar as regiões de escoamento denso e de escoamento diluído.

Devido à estabilidade operacional e maior facilidade para modelagem fluidodinâmica a grande maioria dos trabalhos tem como propósito analisar o escoamento gás-sólido no regime de fase diluída. Este regime é caracterizado por um escoamento uniforme dos sólidos, no qual as oscilações de pressão do sistema de transportes são mínimas.

Curvas de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte são utilizadas para a análise fluidodinâmica de transportadores pneumáticos verticais. Estes gráficos permitem identificar através do comportamento não-linear a região de aceleração e o comprimento correspondente, denominado de comprimento de entrada, e uma região de variação linear, com escoamento desenvolvido, conhecida como região não-acelerada, conforme observado na Figura 2.2 (Ferreira, 1996). O comportamento apresentado nessa

figura pode ser observado tanto para o fluido puro quanto para a mistura gás-sólido. No caso do escoamento do fluido puro o comprimento de entrada é dependente do número de Reynolds e do diâmetro do tubo. Já para a mistura gás-sólido outros parâmetros afetam o valor do comprimento de entrada, tais como: diâmetro, densidade e forma das partículas.

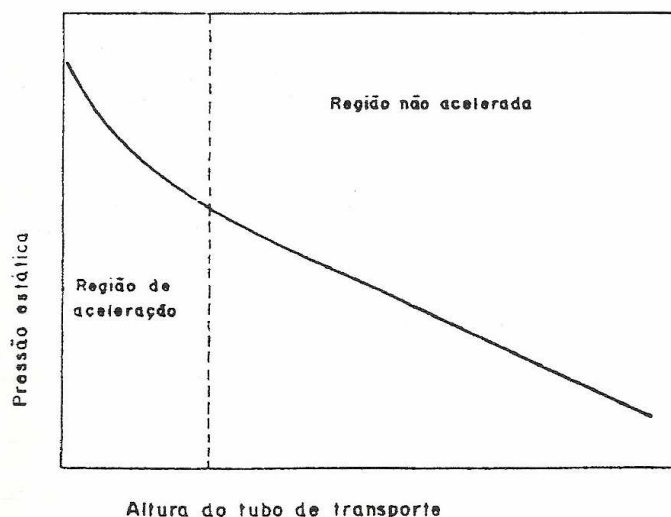


Figura 2.2: Curva característica da pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para o escoamento em fase diluída (Marcus *et al.*, 1990).

2.3. Transportador Pneumático com Alimentador de Partículas Tipo Jorro

O transportador pneumático com alimentador tipo jorro vem sendo estudado desde a década de 90 no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos – SP e no Rensselaer Polytechnic Institute em Troy – NY. Os primeiros trabalhos sobre este equipamento foram realizados por Ferreira (1991) e Ferreira e Freire (1992).

2.3.1. Fluidodinâmica

Ferreira e Freire (1992) realizaram a caracterização fluidodinâmica do transportador pneumático com alimentador tipo jorro. A caracterização foi realizada obtendo-se as curvas características e a vazão de sólidos para diferentes valores de z_0 . Foram utilizadas quantidades diferentes de esferas de vidro com 2,8 mm de diâmetro e os autores observaram que as curvas características eram semelhantes às curvas características do leito de jorro com tubo interno, as quais apresentaram três regiões bem distintas. As curvas apresentaram um comportamento inicial com elevada queda de pressão, atingindo um valor máximo. Após esse valor dava-se início a uma região com um regime de escoamento instável, caracterizado por um escoamento em pulsos, resultando em elevadas quedas de pressão. Devido a esse tipo de escoamento as medidas de queda de pressão foram prejudicadas e os autores optaram por delimitar essa região por duas linhas tracejadas, conforme mostra a Figura 2.3. Após esse comportamento dava-se início ao escoamento estável das partículas.

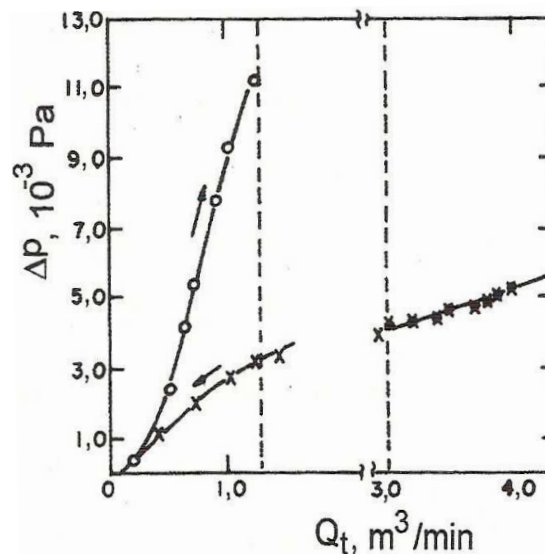


Figura 2.3: Queda de pressão em função da vazão de ar. Esferas de vidro, $d_p = 2.8$ mm; $z_0 = 5,0$ cm e $T = 80^\circ C$ (Ferreira, 1991).

Em relação à vazão dos sólidos, Ferreira e Freire (1992) observaram que maiores quantidades de sólidos eram transportados à medida que aumentava a vazão do ar, a qual em seguida permanecia constante mesmo aumentando-se a vazão do ar, conforme pode ser visto na Figura 2.4. Os autores justificaram este comportamento em função da quantidade de ar desviada para a região anular que dificulta o escoamento das partículas para a região de alimentação, o que faz com que maiores quantidades de partículas não sejam transportadas. Além disso, as vazões de sólidos aumentam com o aumento de z_0 , fato que ocorreu devido a área de escoamento dos sólidos na região de alimentação torna-se maior, facilitando no transporte de maiores quantidades de sólidos.

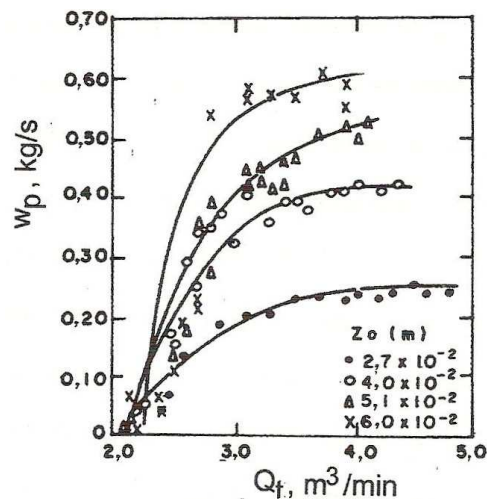


Figura 2.4: Vazão dos sólidos em função da vazão volumétrica do ar para diferentes z_0 (Ferreira, 1991).

Littman *et al.* (1993) analisaram a fluidodinâmica no escoamento gás-sólido com esferas de vidro com 1,0 mm de diâmetro utilizando um transportador pneumático vertical com um sistema de alimentação de sólidos similar ao transportador desenvolvido por Ferreira e Freire (1992). O equipamento utilizado tinha um tubo de transporte com 28,45 mm de diâmetro e 5,49 m de altura. Os autores analisaram o escoamento usando os dados de

vazão de sólidos em função da velocidade do ar e concluíram que a mudança de z_0 influenciou no comportamento fluidodinâmico do leito.

Ferreira (1996) deu continuidade no desenvolvimento do transportador pneumático com alimentador tipo jorro através de uma investigação teórico-experimental, obtendo dados experimentais de pressão estática, vazão de sólidos, porosidade e gradiente de pressão. Os dados de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte apresentaram comportamentos semelhantes para diferentes vazões de ar. Para a vazão de sólidos foi observado que há dependência com a vazão de gás no tubo de transporte, com a distância z_0 e também com a utilização de um bocal redutor na entrada do transportador. A porosidade média no tubo de transporte apresentou valores superiores a 0,980, indicando que o equipamento operou em regime diluído para todas as condições operacionais. Em relação ao gradiente de pressão com variação de z_0 observou que o gradiente de pressão aumentou com o aumento da velocidade do gás e com o aumento de z_0 .

Grbavic *et al.* (1997) analisaram o escoamento gás-sólido com esferas de vidro com 1,94 mm de diâmetro, utilizando um transportador pneumático com alimentação tipo jorro. O tubo de transporte utilizado foi de acrílico, com de 30,0 mm diâmetro e 4,4 m de comprimento. Nesse trabalho foram obtidos dados experimentais de pressão estática para z_0 iguais a 20, 30 e 40 mm e os autores verificaram que os perfis de pressão estática ao longo do comprimento do tubo de transporte tornaram-se maiores com o aumento de z_0 .

Silva (1997) analisou a fluidodinâmica em função do diâmetro da partícula, do diâmetro do tubo e do sistema de alimentação de sólidos e observou que a vazão de sólidos do alimentador tipo jorro e o gradiente de pressão variaram em função da distância z_0 , da vazão de gás e do diâmetro do tubo de transporte, enquanto o diâmetro das partículas não apresentou efeito significativo para a faixa de diâmetros utilizado de 0,24 a 2,85 mm.

Costa (2001) estudou o escoamento gás-sólido relativos aos regimes denso e diluído no leito pneumático com alimentador tipo jorro, analisando a influência de fatores como o diâmetro do tubo e da partícula na velocidade de “choking”, na porosidade média do tubo de transporte, no gradiente de pressão e no fluxo mássico de sólidos. Foram utilizadas esferas de vidro com diâmetros iguais 0,41; 1,00; 1,70 e 2,85 mm e diâmetros de tubo iguais a 81,4; 104 e 147,0 mm. As curvas da pressão axial e do gradiente de pressão em função da velocidade do ar foram analisadas e verificou-se um aumento destas quantidades com o aumento da vazão do gás. Foi observado também que as curvas de pressão estática apresentaram comportamentos semelhantes para as diferentes vazões do gás, com elevada pressão no início seguida de uma diminuição linear com o comprimento do tubo de transporte. Em relação às curvas do gradiente de pressão em função da velocidade do ar, todas apresentaram um ponto de mínimo gradiente de pressão associado à mudança da fase densa para a diluída. Para a porosidade média no tubo de transporte foi verificado um aumento significativo com o aumento da velocidade do gás até um determinado ponto, a partir do qual o seu valor permaneceu praticamente constante. Além disso, verificou que os valores de porosidade em função da velocidade do gás auxiliavam na identificação da região do leito denso e diluído.

2.3.2. Transferência de calor

Os estudos relacionados à transferência de calor no transportador pneumático com alimentador tipo jorro encontram-se em desenvolvimento. Serão apresentados alguns trabalhos que realizaram estudos de transferência de calor no transporte pneumático.

Rocha (1988) analisou o comportamento térmico e fluidodinâmico em um secador pneumático vertical, com 4 m de altura e 52,5 mm de diâmetro. No tubo de transporte

foi realizado um isolamento térmico constituído por lã de vidro com 6,35 mm de espessura. Foram utilizadas partículas de alumina, areia e vidro com diâmetros médios que variaram de 0,188 a 0,400 mm.

Casavechia (1993) realizou um estudo teórico e experimental da fluidodinâmica e da troca térmica gás-sólido no transporte pneumático vertical de partículas sólidas de tamanho uniforme e de misturas binárias. O equipamento era composto por um tubo com 4,0 m de altura e 52,5 mm de diâmetro, onde determinou os coeficientes de transferência de calor gás-sólido utilizando partículas de diâmetros uniformes iguais a 135, 346 e 750 μm de diâmetro. Em seguida realizou testes com misturas binárias com mesmo material. Foram obtidos resultados simulados e experimentais dos perfis de pressão e temperatura do ar ao longo do tubo de transporte, bem como a temperatura de saída das partículas, concluindo que na região de escoamento acelerado, a troca de calor entre o gás e as partículas foi mais acentuada que na região de escoamento estabelecido, devido aos grandes gradientes de velocidades do fluido e dos sólidos, e da concentração volumétrica dos sólidos.

Narimatsu (2004) analisou os efeitos térmicos na secagem de partículas porosas e não porosas no escoamento gás-sólido em um transportador pneumático vertical com um tubo de transporte com 4,0 m de comprimento e 53,4 mm de diâmetro. Nesse trabalho utilizou-se esferas de vidro e de alumina com mesmo diâmetro, 3,68 mm. Foram obtidos os perfis de temperatura do ar ao longo do tubo de transporte para diferentes velocidades do ar e vazões de alimentação, verificando que a transferência de calor foi influenciada significativamente tanto pela concentração dos sólidos quanto pela velocidade do ar. A Figura 2.5 apresenta os perfis axiais de temperatura do ar obtidos mantendo-se a velocidade do ar praticamente constante e diferentes vazões de sólidos.

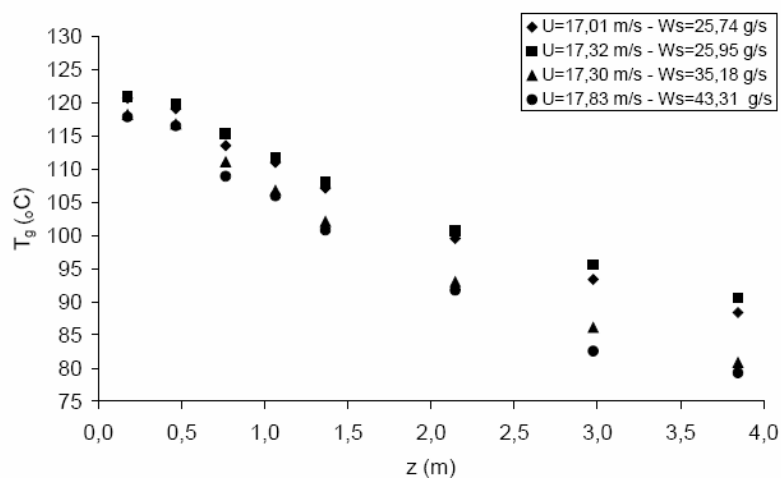


Figura 2.5: Temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para esferas de vidro (Narimatsu, 2004).

Rajan *et al.* (2008) analisaram os efeitos de parâmetros fluidodinâmicos como, vazão de sólidos, velocidade do ar e dos sólidos e diâmetros diferentes na transferência de calor gás-sólido e no coeficiente de transferência de calor. Esta análise foi realizada em um transportador pneumático utilizando gesso e ar quente como materiais e observaram que a vazão de sólidos influenciava na transferência de calor e que os menores coeficientes de transferência de calor foram obtidos no escoamento diluído, em que se encontraram baixas concentrações de sólidos.

2.4. Modelagem Matemática

A modelagem matemática em transportadores pneumáticos é de suma importância para o processo e desenvolvimento destes sistemas. Além disso, a possibilidade de aliar dados simulados aos experimentais tem ajudado os pesquisadores a compreender melhor os fenômenos de transferência envolvidos neste equipamento (Ferreira, 1996; Silva, 1997; Costa, 2001).

Na literatura, são encontrados inúmeros modelos que têm como objetivo descrever o comportamento fluidodinâmico, térmico e de massa em sistema de transporte pneumático. Em relação ao comportamento fluidodinâmico, a modelagem fluidodinâmica é frequentemente realizada a partir dos balanços de massa e quantidade de movimento para as fases sólida e fluida. Teoricamente, o conjunto das duas equações da continuidade e duas da quantidade de movimento costuma ser suficiente para descrever os perfis fluidodinâmicos da velocidade dos sólidos e do gás, da porosidade e da pressão (Silva, 1997).

Alguns modelos unidimensionais são aplicados para descrever o escoamento vertical da mistura gás-sólido nas regiões aceleradas e não-aceleradas (Capes e Nakamura 1973, Gidaspow 1978, Arastoopour e Gidaspow 1979).

2.4.1. Forças de atrito com a parede e força de arraste fluido-partícula

Em geral, as equações de quantidade de movimento para a fase fluida e sólida utilizadas em escoamento de leitos verticais consideram as contribuições dos termos referentes à aceleração, força peso, força de arraste entre as fases e perda de atrito com a parede. Entretanto, não é parte deste trabalho fazer um estudo detalhado sobre estas contribuições. Logo, serão apenas definidas as forças que são dependentes dos parâmetros fluidodinâmicos, como: a força de atrito fluido-parede, força de atrito partícula-parede e a força de arraste fluido-partícula.

A força de atrito fluido-parede e a força de atrito partícula-parede são estimadas considerando as contribuições individuais das tensões de cisalhamento de cada fase. O procedimento usual adotado na literatura expressa cada termo como uma generalização da equação de Fanning, utilizada para definir o fator de atrito para escoamento de fluido no interior de tubos (Ferreira, 1996). Estas forças estão ligadas ao coeficiente de atrito fluido-parede (f_f) e o coeficiente de atrito partícula-parede (f_p) através das definições:

$$F_f = 2f_f \rho_f U^2 / D_t \quad (2.1)$$

$$F_p = 2f_p \rho_p (1 - \varepsilon) v^2 / D_t \quad (2.2)$$

A força de arraste entre as fases, que aparece com a denominação de F_d é uma função cuja determinação é complexa do ponto de vista teórico, devido a fenômenos físicos que envolvem o escoamento em camada limite. Então o procedimento mais usual na literatura é considerar a força de arraste por unidade de volume na suspensão gás-sólido (Ferreira, 1996). Sendo definida pela Equação 2.3.

$$F_d = \beta(u - v)^2 \quad (2.3)$$

onde β é o coeficiente de arraste.

2.4.2. Coeficiente de atrito fluido-parede, partícula-parede e de arraste

As forças que foram definidas no item anterior são dependentes dos coeficientes de atrito partícula-parede (f_p), fluido-parede (f_f) e do coeficiente de arraste (β).

Para a estimativa do coeficiente de atrito fluido-parede (f_f), existem inúmeras correlações bem estabelecidas na literatura, que fornecem boas previsões para a força de atrito fluido-parede (f_f). O coeficiente de atrito é normalmente expresso como uma função do número de Reynolds do escoamento e da rugosidade do tubo de transporte (Ferreira, 1996).

No Quadro 2.1 são apresentadas algumas correlações encontradas na literatura sobre o coeficiente de atrito fluido-parede em tubos lisos.

Quadro 2.1: Correlações para determinação do coeficiente de atrito para tubos lisos.

Referências	Correlações	Observações
McAdams ¹ (1962)	$f_f = 0,046 / \text{Re}^{-0,25}$ (2.4)	$5000 < \text{Re} < 2 \times 10^5$
Blasius ² (1913)	$f_f = 0,0791 \text{Re}^{-0,25}$ (2.5)	$5000 < \text{Re} < 10^5$
Konakov ³ (1950)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = 1,564 \ln \text{Re}^{-3}$ (2.6)	$4000 < \text{Re} < 10^8$

1,2,3 – *apud* Narimatsu (2004)

No caso do fator de atrito partícula-parede (f_p) a determinação não é tão simples. Apesar de existirem na literatura muitas correlações empíricas, os valores fornecidos são discrepantes entre si, principalmente para elevadas velocidades dos sólidos comumente observados no transporte pneumático (Ferreira, 1996). No Quadro 2.2 são apresentadas algumas das correlações mais comumente citadas para fator de atrito partícula-parede no transporte pneumático vertical.

Quadro 2.2: Correlações para determinação do coeficiente partícula-parede.

Referências	Correlações
Konno e Saito ¹ (1969)	$f_p = 0,0285 \left[\frac{V}{(1-\varepsilon)\sqrt{gD_t}} \right]^{-1}$ (2.7)
Capes e Nakamura ² (1973)	$f_p = 0,206 \left[\frac{V}{(1-\varepsilon)} \right]^{-1,22}$ (2.8)
Stemerding ³ (1962)	$f_p = 0,003$ (2.9)
Garic <i>et al.</i> (1995)	$f_p = 1,7e^{-3} \left[\frac{(1-\varepsilon)U_t}{\varepsilon U} \right] \left[\frac{U_t(1-\varepsilon)}{(u-v)} \right]^{-1,5}$ (2.10)

1,2,3 *apud* – Narimatsu (2004)

O Quadro 2.3 estão apresentadas correlações para a estimativa do coeficiente de arraste.

Quadro 2.3: Correlações para a estimativa do coeficiente de arraste.

Referências	Correlações	Observações
Littman <i>et al.</i> (1993)	$\frac{\beta(u-v)^2(\pi/3)dp^3}{(1-\varepsilon)} = C_d \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho_f (u-v)^2$ (2.11)	$C_d = \frac{4\varepsilon d_p(\rho_p - \rho_f)g}{3 \rho_f (u-v)^2} = \frac{4}{3} Ar \frac{\varepsilon}{Re_p^2}$
Grbavic <i>et al.</i> (1991)	$\frac{\beta}{\beta_{mF}} = 1 - C_2 + \frac{1}{\lambda} - \left[\left(\lambda \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mF}}{1 - \varepsilon_{mF}} + C_1 \right)^2 \right]^{1/2}$ (2.12)	$C_1 = \left[1 + \left(U_{mF}^2 / \varepsilon_{mF}^3 U^2 t \right)^2 \right]^{-1/2}$ $C_2 = \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - C_1^2}$ $\lambda = \sqrt{1 - C_1^2} - C_1$

Segundo Ferreira (1996) o coeficiente de arraste é função de características da mistura gás-sólido, como porosidade e propriedades das fases. A aplicação da equação para a modelagem do escoamento no transporte pneumático requer a estimativa do coeficiente de arraste β .

A grande maioria dos trabalhos que estudaram os fenômenos de quantidade de movimento através da modelagem matemática abordou o escoamento em fase diluída, devido sua formulação que é mais fácil de ser resolvida. Um dos modelos mais utilizados para descrever o escoamento gás-sólido no regime diluído é o modelo proposto por Capes e Nakamura (1973).

Ferreira (1996) analisou a aplicabilidade do modelo proposto por Capes e Nakamura (1973) para descrever o escoamento vertical da mistura gás-sólido na região acelerada e não-acelerada do transportador pneumático com alimentador tipo jorro. Para o tratamento dos dados foi utilizada a metodologia proposta por Littman *et al.* (1993) para a região de aceleração e a metodologia proposta por Massarani (1996) para fora da região de

entrada. Os resultados simulados foram comparados com os resultados experimentais de gradiente de pressão em função do comprimento do tubo de transporte, taxa de circulação, vazões volumétricas de gás e porosidade da mistura, concluindo que o modelo proposto por Capes e Nakamura (1973) mostrou-se adequado para prever os valores de gradiente de pressão, requerendo, no entanto, a utilização de equações adequadas para a previsão da força de atrito sólido-parede.

Grbavic *et al.* (1997) analisaram o escoamento gás-sólido de um transportador pneumático vertical com alimentador tipo jorro. Neste estudo foi utilizado também o modelo proposto por Capes e Nakamura (1973) e o modelo variacional proposto por Grbavic *et al.* (1991), para calcular o coeficiente de arraste gás-sólido. Os autores avaliaram também o comportamento fluidodinâmico na região de alimentação dos sólidos, a partir do modelo proposto por Mathur e Epstein (1974), sendo que para esse modelo foram assumidas algumas hipóteses, como: o diâmetro da entrada do alimentador e do tubo de transporte ser igual e ocorrendo a transferência da quantidade de movimento somente na coordenada z. Os dados experimentais de pressão estática na região de aceleração foram comparados com os resultados simulados, e concluíram que ambos apresentaram boa concordância.

Um trabalho mais atual baseado nas formulações propostas por Capes e Nakamura (1973) é o de Zorana *et al.* (2004), os quais utilizaram o modelo para prever o comportamento fluidodinâmico no escoamento gás-sólido na fase diluída em um leito de jorro com tubo interno na secagem de suspensões. Consideraram também que o diâmetro entre a base do alimentador e a entrada do tubo de transporte é igual. A simulação numérica do modelo pode prever o perfil axial de porosidade, queda de pressão e velocidade da partícula e concluíram que o modelo representou bem os fenômenos envolvidos, pois apresentaram boa concordância entre os resultados simulados e os dados experimentais. Além disso, relataram que o leito de jorro com tubo interno apresentou bom desempenho durante o processo.

2.5. Secagem

Além dos diversos estudos realizados sobre o comportamento fluidodinâmico deste equipamento, o Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, desde o trabalho de Ferreira e Freire (1992), vem estudando o desempenho e a aplicabilidade do transportador pneumático com alimentação tipo jorro, juntamente com o auxílio de partículas inertes, para a secagem de pastas e suspensões.

A utilização de partículas inertes no leito de jorro já é conhecida. Muitos autores analisaram os aspectos fluidodinâmicos neste tipo de secagem e relataram que o movimento cíclico das partículas promove um elevado contato fluido-partícula, contribuindo com os fenômenos de transferência de calor e massa (Pham, 1983; Patel *et al.*, 1986; Schneider e Bridgwater, 1990, Barrett e Fane 1990; Spitzner Neto *et al.*, 2001 e Bachelos *et al.*, 2005).

Ainda não foram encontrados trabalhos que tenham utilizado um secador pneumático com o sistema de alimentação do tipo jorro na secagem de pastas e suspensões. Os mais diferentes tipos de equipamento encontrados foram os leitos fluidizados e os leitos de jorro (Schneider e Bridgwater, 1990; Grbavic *et al.*, 2000; Spitzner Neto *et al.*, 2001) e também em leitos de jorro com tubo “draft” na secagem de várias suspensões, como é o caso de Zorana *et al.* (2004).

Como a configuração do equipamento utilizado nesse trabalho apresenta semelhança com o leito de jorro com tubo interno, acredita-se que durante o processo de secagem as partículas sejam recobertas por um filme líquido, as quais entram úmidas no tubo de transporte, sendo que o transporte a altas velocidades do ar e transferência de calor, a camada superficial formada nas partículas sejam secas até tornarem-se quebradiças. O atrito

entre as partículas contribui para que o produto seco se desprenda, sendo transportado e separado pelo processo de separação gás-sólido.

De acordo com o que foi apresentado nesta revisão sobre o transporte pneumático com alimentação tipo jorro fica evidente que ainda existe a possibilidade de realizar estudos sobre a caracterização fluidodinâmica no leito bem, como analisar o comportamento térmico do mesmo. Isto poderá viabilizar a análise do escoamento gás-sólido para diferentes condições operacionais e configuração do equipamento, assim como avançar nos estudos referentes à transferência de calor através do processo de secagem.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, o equipamento e os procedimentos experimentais aplicados tanto no estudo fluidodinâmico quanto na evaporação da água, bem como o modelo matemático utilizado.

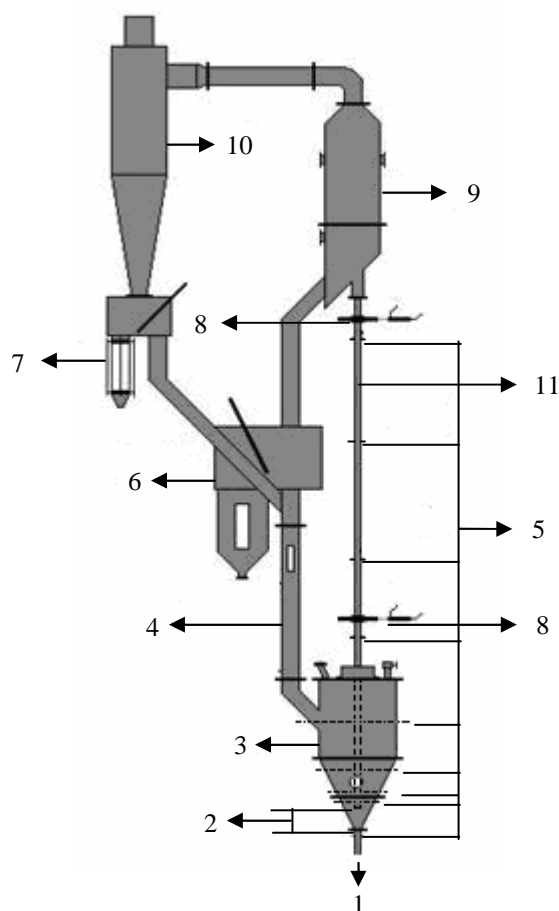
3.1. Materiais

Esferas de vidro com $d_p = 2,7$ mm e $\rho_p = 2500$ kg/m³ foram utilizadas como partículas inertes, adquiridas do fabricante Potther Ltda. O diâmetro médio das partículas foi determinado por peneiramento e a massa específica determinada por picnometria a gás hélio. Como líquido foi utilizado a água, considerada como uma suspensão “ideal”.

3.2. Equipamento

Para a realização deste trabalho foi utilizado um transportador pneumático com alimentador tipo jorro disponível no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, o qual já foi estudado anteriormente por Silva (1997), Costa (2001) e Narimatsu (2004).

Este equipamento é constituído basicamente por: alimentador de sólidos do tipo jorro, tubo de transporte, câmara de desaceleração dos sólidos e um tubo de reciclo. Além desses, alguns periféricos e sistemas de medidas estão presentes, como: soprador, linha de “*by pass*”, placa de orifício, aquecedor, sistema de alimentação da suspensão, válvulas guilhotinas, transdutores de pressão, termopares e um sistema de aquisição de dados. Na Figura 3.1 é apresentado um diagrama esquemático do equipamento.



- | | | |
|--------------------------|--|-----------------------------|
| (1) entrada de ar | (2) região de alimentação de sólidos | (3) leito de jorro |
| (4) tubo de reciclo | (5) transdutores de pressão e termopares | (6) caixa de amostragem |
| (7) caixa coletora de pó | (8) válvula guilhotina | (9) câmara de desaceleração |
| (10) ciclone | (11) tubo de transporte | |

Figura 3.1: Diagrama esquemático do transportador pneumático com alimentador tipo jorro.

O ar é fornecido por um soprador da marca IBRAM com potência de 7,5 hP e vazão máxima de $4,0 \text{ m}^3/\text{min}$, o qual impulsiona o ar através de uma tubulação de 53,4 mm de diâmetro. Ainda na mesma tubulação a vazão do ar era ajustada por um sistema “by pass” constituído por duas válvulas gavetas.

A vazão volumétrica foi medida por um medidor de duplo orifício, cuja aferição foi realizada com um medidor tipo Venturi calibrado, tomado como padrão. A Equação 3.1 de ajuste para o medidor de orifício é:

$$Q = 0,2672\sqrt{\Delta H} \quad (3.1)$$

sendo Q a vazão mássica fornecida ao sistema em kg/min e ΔH a pressão manométrica em cm Hg.

O aquecimento do ar de entrada é realizado por um trocador de calor constituído por quatro resistências elétricas de 1000 W de potência cada uma. O conjunto de resistências é ligado a um controlador de temperatura da marca Flyever, permitindo o controle da potência de aquecimento a fim de ajustar a temperatura desejada para o ar.

A alimentação dos sólidos para o tubo de transporte é realizada por um alimentador tipo jorro, conforme apresenta o desenho esquemático na Figura 3.2.

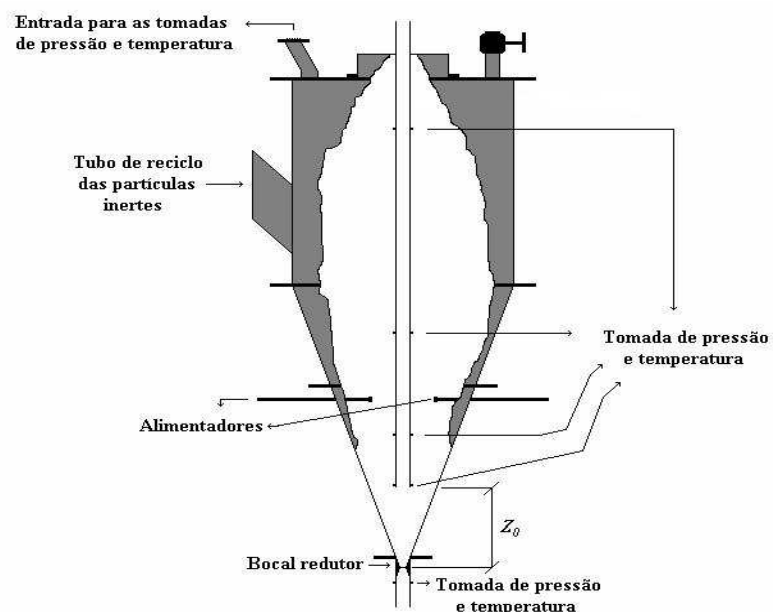


Figura 3.2: Diagrama esquemático do alimentador tipo jorro.

Este alimentador possui uma configuração semelhante a um leito de jorro com tubo interno, onde os sólidos realizam um movimento descendente pela região anular, sendo transportados por uma corrente de ar ascendente através do tubo de transporte. A sua configuração apresenta dimensões de 0,60 m de altura e diâmetro variando de 0,03 m na base até 0,50 m na tampa superior.

Na parte inferior do leito de jorro está localizado um bocal redutor, cuja finalidade é direcionar melhor o fluxo de ar para o tubo de transporte, minimizando-se os desvios do fluxo de ar para a região anular do alimentador (Silva, 1997). Na Figura 3.3 é mostrado com detalhes as dimensões deste bocal.

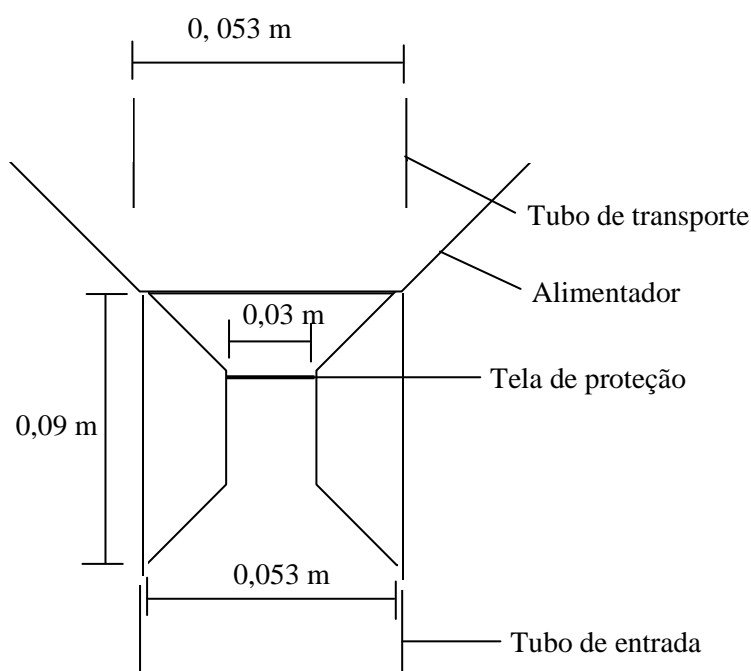


Figura 3.3: Esquema do bocal redutor localizado na entrada de ar.

O tubo de transporte é feito de aço carbono com diâmetro de 53,0 mm e 4 m de comprimento. Este tubo inicia-se no alimentador e encerra-se na câmara de desaceleração. Esta câmara possui uma base inclinada com angulação de 45°, onde os sólidos após atingirem este reservatório podem ser direcionados para uma caixa de amostragem ou para o sistema de

reciclo. A linha de reciclo dos sólidos é constituída por um tubo de diâmetro de 104,8 mm e 4 m de comprimento, com a finalidade de retornar os sólidos ao alimentador, permitindo que seja realizado o movimento cíclico dos sólidos no equipamento.

Para a medida de vazão de sólidos, utilizou-se um sistema de coleta localizado na linha de reciclo dos sólidos. Quando este sistema é acionado, o escoamento dos sólidos é desviado para a caixa de amostragem possibilitando a coleta dos mesmos. Na Figura 3.4 é apresentado um esquema da caixa de amostragem de sólidos

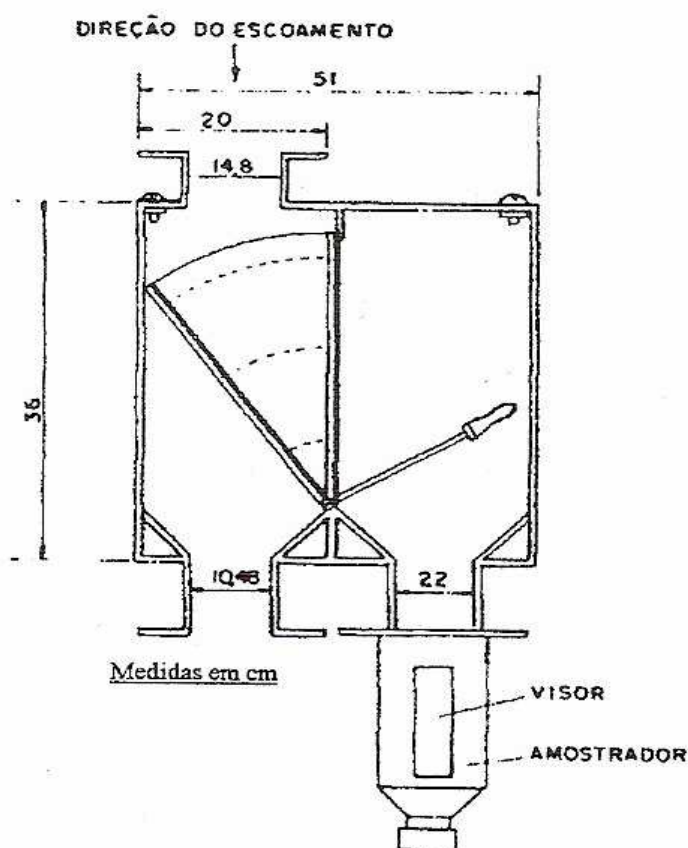


Figura 3.4: Esquema da caixa de amostragem de sólidos (Costa, 2001).

As medidas de porosidade média no tubo de transporte foram realizadas através da retenção dos sólidos no próprio tubo. Para isso, existem duas guilhotinas no tubo de transporte situadas nas posições axiais em z igual a 1,54 m e z igual a 2,98 m, as quais são

acionadas simultaneamente para interromper o escoamento da suspensão. A Figura 3.5 ilustra a guilhotina.

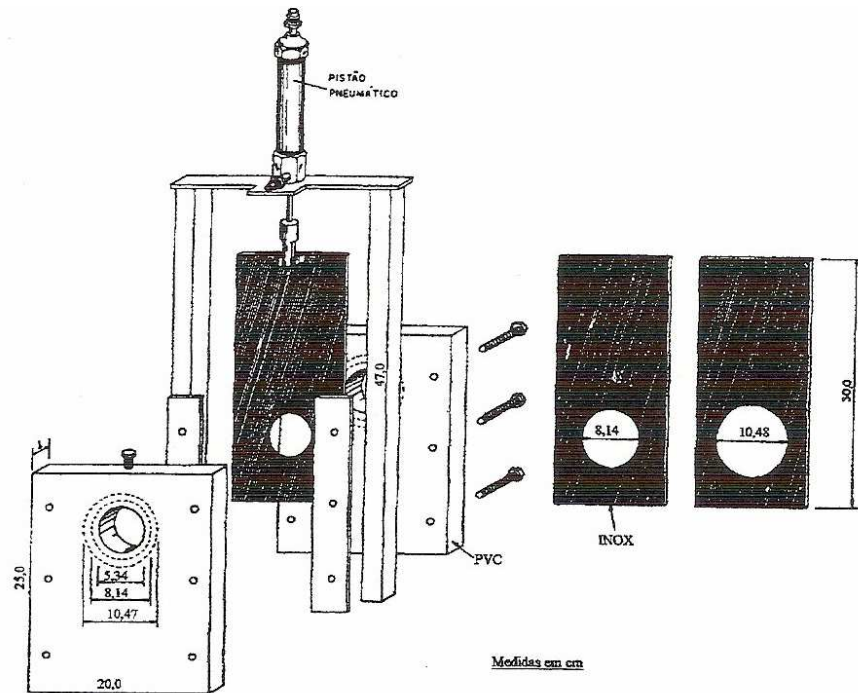


Figura 3.5: Modelo da válvula guilhotina instalada no equipamento (Costa, 2001).

Após o acionamento das válvulas os sólidos ficavam retidos, os quais eram coletados e em seguida pesados em uma balança analítica. Desta forma conhecendo-se a massa retida, a densidade dos sólidos e o volume total do tubo compreendido entre as guilhotinas, a porosidade média da suspensão era determinada pela Equação 3.2.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_p}{V_T} \quad (3.2)$$

onde, V_p é o volume ocupado pelas partículas coletadas e V_T é o volume da seção de tubo compreendida entre as duas válvulas.

Nos ensaios de evaporação foi utilizado um sistema de alimentação da água, constituído de um reservatório com capacidade para 20 L e uma bomba peristáltica. A água

foi bombeada para a região anular do alimentador utilizando-se quatro gotejadores localizados na posição axial de 0,20 m a partir da base do mesmo e distribuído na região anular, conforme mostrado na Figura 3.6.

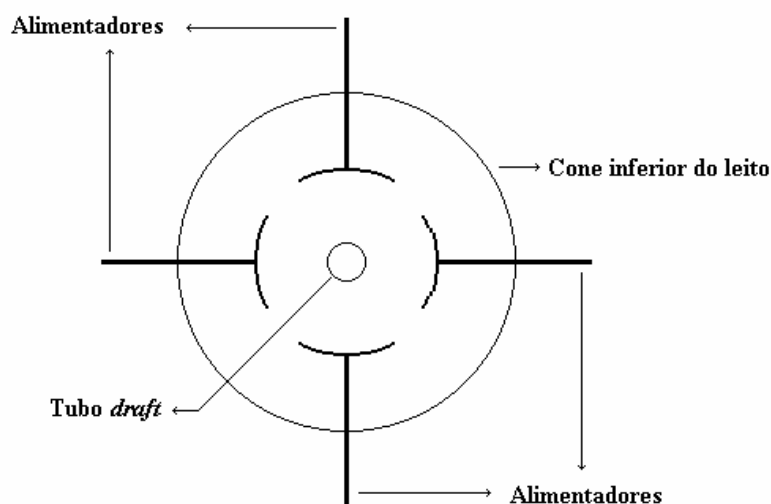


Figura 3.6: Esquema do sistema de alimentação da suspensão no interior do alimentador tipo jorro.

As medidas de pressão realizadas na entrada do equipamento e nas diferentes posições axiais do tubo de transporte foram obtidas a partir de nove transdutores de pressão com faixa de operação 0-1 psi e de 12-24 mA, da marca Auto Tran Incorporated. As tomadas de pressão foram instaladas nas seguintes posições: uma na entrada do transportador ($z=0$ m) e oito no tubo de transporte a partir da entrada do tubo: 0,07; 0,16; 0,36; 0,66; 1,78; 2,6 e 3,47 m. Usando este conjunto de transdutores, obteve-se a queda de pressão na entrada do equipamento e os valores da pressão estática nessas posições. Para a obtenção destas medidas utilizou-se um sistema de aquisição de dados da marca LYNX constituído por uma placa condicionadora de sinais e uma placa de aquisição de dados. Para a visualização das medidas de pressão foi utilizada uma rotina desenvolvida usando o software LabView, a qual fornecia os dados de pressão, desvio padrão e vazão mássica a uma frequência de 60 Hz.

As medidas de temperatura foram obtidas a partir de onze termopares instalados no equipamento nas seguintes posições axiais: um na entrada do transportador, oito nas mesmas posições, coincidentes com as tomadas de pressão e dois na saída do transportador. Esses dois foram utilizados para medir as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido. Os termopares utilizados são do tipo T e possuem uma cápsula para proteger a extremidade onde se localiza a junção do termopar. Esta extremidade possui orifícios que permitem a passagem do gás e impedem o contato da partícula com a sua junção. A Figura 3.7 apresenta o esquema do termopar utilizado.

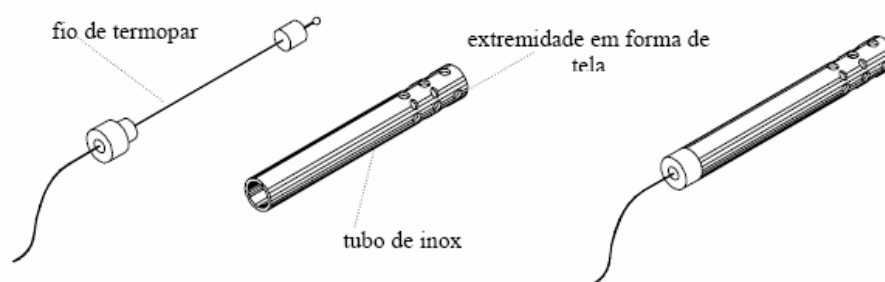


Figura 3.7: Esquema do termopar com proteção (Narimatsu, 2004)

Para a obtenção das medidas de temperatura todos os termopares foram conectados a um aparelho DigiSence da marca ColerPamer. Foi utilizado um software que acompanha o equipamento, capaz de efetuar as leituras de temperatura em intervalos de 30 segundos.

3.3. Procedimento Experimental

3.3.1. Análise fluidodinâmica

Para um z_0 fixo, alimentava-se o equipamento com as partículas inertes através de uma abertura localizada na parte superior do alimentador. Em seguida o soprador foi ligado

com a válvula ajustada para a vazão máxima de ar. Depois aguardava-se em torno de uma hora para que o equipamento atingisse o estado de regime permanente. O regime permanente era estabelecido quando os valores de temperaturas nas posições de medidas não apresentassem uma variação significativa ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$). Depois de atingido o regime permanente realizaram-se em conjunto as medidas experimentais de pressão e temperatura do ar na entrada do equipamento e ao longo do tubo de transporte, assim como as temperaturas do ar de bulbo seco e bulbo úmido na saída do equipamento.

Determinava-se a vazão de sólidos, desviando-se o fluxo de material sólido para a caixa de amostragem por um tempo pré-estabelecido. Para cada condição operacional os sólidos eram coletados num recipiente, repetindo esta operação por três vezes. O material coletado era pesado numa balança digital, com a massa de sólidos e o tempo, determinava-se a vazão mássica de sólidos. À medida que se encerrava esse procedimento, o sistema era desligado e um novo z_0 era estabelecido. A modificação de z_0 era realizada utilizando-se de carretéis localizados na junção do tubo de transporte localizado abaixo da guilhotina inferior. Após esta modificação o equipamento era ligado, repetia-se o procedimento e um novo conjunto de dados era obtido.

Para os ensaios de porosidade, as válvulas das guilhotinas eram acionadas fechado-as automaticamente. Em seguida a alimentação do ar era suspensa, desviada para o meio ambiente com o fechamento de uma das válvulas instaladas na entrada do equipamento. Desmontava-se o tubo e a massa das partículas retidas eram medidas em uma balança. Após a montagem do tubo e suposição do material ao sistema, o ar voltava a ser alimentado fixando-se uma nova vazão e dando início a um novo ciclo.

As curvas características foram construídas a partir dos dados de queda de pressão iniciando-se com o aumento gradativo da velocidade do ar, sendo que para cada acréscimo do mesmo media-se a queda de pressão na entrada, bem como a pressão ao longo

do tubo de transporte. Ao atingir o valor máximo da velocidade, iniciava-se a operação inversa. A velocidade era reduzida e para cada valor atingido media-se novamente a pressão. Este procedimento foi realizado inicialmente com equipamento operando vazio e posteriormente com sólidos. Para o equipamento vazio as medidas de queda de pressão foram ajustadas à função potência ($y=aU^b$) e subtraídas da queda de pressão total, a partir da Equação 3.3. Assim, eram obtidos os valores da queda de pressão do equipamento operando somente com sólidos.

$$\Delta P_T = \Delta P_{sp} + \Delta P_p. \quad (3.3)$$

sendo, ΔP_T a queda de pressão total, ou seja, ar e partículas, ΔP_{sp} a queda de pressão sem partículas e ΔP_p a queda de pressão somente com partículas.

Os gráficos de gradiente de pressão foram obtidos pela regressão linear dos dados de pressão em função do comprimento do tubo de transporte, exceto aqueles relativos à região acelerada. Para cada velocidade utilizada, tem-se, desta maneira, o gradiente de pressão. O programa computacional utilizado para realizar as regressões lineares foi o Origin 7.5 ®.

3.3.2. Análise da evaporação da água

O soprador era ligado com a válvula ajustada para a vazão máxima de ar. Aguardava-se que o equipamento entrasse em regime permanente. Após atingir esta condição o ar era desviado parcialmente até atingir o valor pré-estabelecido para a velocidade do ar de 72,0 m/s. A partir deste ponto iniciava-se a alimentação de 20 ml/min de água e a obtenção dos dados de pressão, temperatura do ar ao longo do tubo de transporte e as temperaturas de

bulbo seco e bulbo úmido na saída do equipamento. Estes dados foram coletados até que o sistema retornasse à nova condição de regime permanente. À medida que se encerrava esse procedimento, para a mesma velocidade do ar, aumentava-se a vazão de alimentação em 10 ml/min e um novo conjunto de dados era obtido. Este procedimento foi executado até que o sistema apresentasse sinais de instabilidade. Os ensaios foram efetuados para duas temperaturas diferentes do ar de entrada, inicialmente a 100 e posteriormente a 120°C.

3.4. Modelagem Matemática da Fluidodinâmica

O modelo utilizado neste trabalho é similar ao de Zorana *et al.* 2004, o qual analisou a fluidodinâmica do leito de jorro com tubo interno. Este leito foi dividido em duas regiões: na região da alimentação dos sólidos, foram utilizadas as equações formuladas por Marthur e Epstein (1974) e na região de transporte foram utilizadas as equações formuladas por Capes e Nakamura (1973). Assim, o modelo foi aplicado nessas duas regiões: (i) na região de alimentação dos sólidos, compreendida entre a entrada do tubo de transporte ($z_1 = z_0$), denominada de Região 1 e z_0 , e (ii) no tubo de transporte, desde a entrada do mesmo ($z = z_0$) até seu comprimento final ($z = L$), denominada de Região 2. A Figura 3.8 apresenta um desenho esquemático destas regiões.

A solução do modelo inicia-se na Região 1, a qual foi aplicada o modelo proposto por Marthur Epstein, (1974). Este modelo fornece uma equação diferencial para a velocidade dos sólidos advinda de um balanço de força na fase sólida realizada em um leito de jorro convencional dada pela Equação 3.4.

$$\frac{dv}{dz_1} = \frac{3\rho_f(u-v)^2 C_D}{3d_p \rho_p v} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p v} - \left(\frac{v^2}{z_1 v} \right) \quad (3.4)$$

O modelo também leva em consideração a variação axial da porosidade e da velocidade intersticial do fluido na Região 1. Sendo que para a porosidade a Equação 3.5, em que foi obtida através de um balanço de massa, desprezando a vazão de ar para a região anular e para a velocidade intersticial do fluido a Equação 3.6.

$$v(1 - \varepsilon) = c_s \frac{z}{L} \text{ isolando } \varepsilon, \text{ tem-se } \varepsilon = 1 - \frac{c_s z}{Lv} \quad 3.5$$

$$u = U/\varepsilon \quad 3.6$$

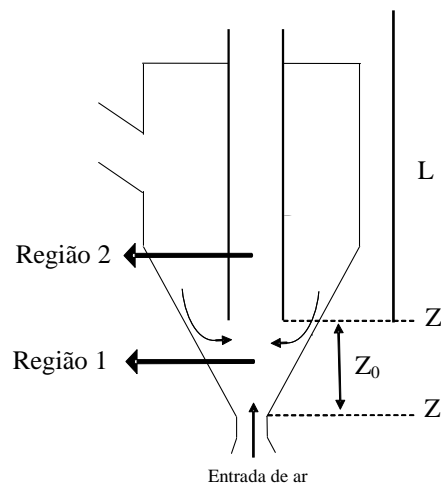


Figura 3.8: Diagrama esquemático da região de alimentação (Região 1) e a região do tubo de transporte (Região 2).

Para a Região 1 o modelo foi resolvido considerando que:

- não há transferência de quantidade de movimento na direção radial e angular,
- os diâmetros compreendidos entre a base do alimentador e a entrada do tubo de transporte variam linearmente na coordenada z , vide Equação 3.7 e Figura 3.9.

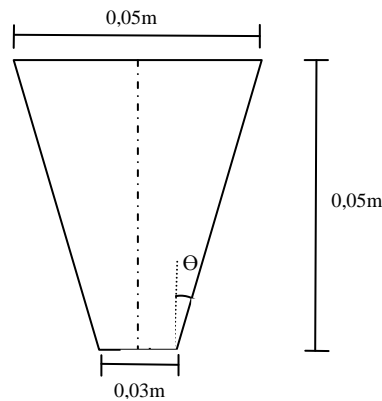


Figura 3.9: Diagrama esquemático da geometria que envolve a região de alimentação dos sólidos

$$d(z_1) = d_0 + z_0 \tan g\Theta \quad (3.7)$$

Esta equação foi baseada nas dimensões apresentadas na Figura 3.9, a qual expressa o diâmetro na região de alimentação dos sólidos ao longo de z_0 . Assim, a Equação 3.4 combinada com as Equações 3.5 e 3.6 foram integradas numericamente nesta região para fornecer os resultados simulados de velocidade dos sólidos, velocidade do gás e porosidade.

Na Região 2 foi utilizado o modelo proposto por Capes e Nakamura (1973) o qual é constituído por equações diferenciais da continuidade e quantidade de movimento para as fases fluida e sólida. Como são quatro as variáveis a serem obtidas (u , v , $-dP/dz$ e ϵ) são necessárias apenas quatro equações diferenciais, sendo que as equações da continuidade para as fases fluida e sólida, Equações 3.8 e 3.9 e as Equações 3.11 e 3.12 para a pressão e porosidade foram integradas numericamente para obter os resultados simulados das velocidades do gás e dos sólidos, da pressão e da porosidade.

- Equação da continuidade para a fase fluida

$$\frac{d}{dz}(u\varepsilon) = 0 \quad \text{logo} \quad u\varepsilon = cte \quad (3.8)$$

onde a velocidade superficial do fluido é definida por: $u\varepsilon = \frac{G_f}{\rho_f A} = U$

- Equação da continuidade para a fase sólida

$$\frac{d}{dz}[v(1-\varepsilon)] = 0 \quad \text{logo} \quad v(1-\varepsilon) = cte \quad (3.9)$$

onde a velocidade dos sólidos é definida por: $v(1-\varepsilon) = \frac{G_p}{\rho_p A} = c_s$

- Equação de quantidade de movimento para a mistura

$$\rho_f \frac{d}{dz}(u^2) + \rho_p \frac{d}{dz}[(1-\varepsilon)v^2] = \left[-\frac{dP}{dz} \right] - [\rho_p(1-\varepsilon) + \varepsilon\rho_f]g - F_p - F_f \quad (3.10)$$

Simplificando, resulta-se na seguinte equação

$$\left[-\frac{dP}{dz} \right] = [\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_f\varepsilon]g + F_p + F_f + \gamma \frac{d\varepsilon}{dz} \quad (3.11)$$

onde $\gamma = \rho_p v^2 - \rho_f u^2$

- Equação para a porosidade

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{\beta(u-v^2) - \varepsilon[(\rho_p - \rho_f)g(1-\varepsilon) + F_p] + F_f(1-\varepsilon)}{\gamma\varepsilon + \rho_f u^2} \quad (3.12)$$

3.4.1 Parâmetros fluidodinâmicos

As forças de atrito fluido-parede e partícula-parede e as correlações utilizadas para a previsão dos parâmetros do modelo são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Parâmetros fluidodinâmicos utilizados no modelo

Parâmetros	Referências	Equações
$F_f = 2f_f \rho_f U^2 / D_t$	Bird <i>et al.</i> (2004)	2.1
$F_p = 2f_p \rho_p (1-\varepsilon)v^2 / D_t$	Bird <i>et al.</i> (2004)	2.2
$f_f = 0,0791\text{Re}^{0,25}$	Blasius (1913)	2.5
$f_p = 1,7e^{-3} \left[\frac{(1-\varepsilon)U_t}{\varepsilon^3 U} \right] \left[\frac{U_t(1-\varepsilon)}{(u-v)} \right]^{-1,5}$	Garic <i>et al.</i> (1990)	2.10
$\frac{\beta}{\beta_{mF}} = 1 - C_2 + \frac{1}{\lambda} \left[1 - \left(\lambda \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mF}}{1 - \varepsilon_{mF}} + C_1 \right)^2 \right]^{1/2}$	Grbavic <i>et al.</i> (1991)	2.13

Os parâmetros de mínima fluidização (U_{mf} e ε_{mf}) utilizados para calcular a constante variacional (β_{mf}) da Equação (2.13) foram obtidos a partir de dados experimentais do trabalho de Littman *et al.* (1979). Através do diâmetro das partículas eram determinados esses parâmetros. Os valores encontrados e posteriormente usadas no modelo foram $U_{mf} = 1,43$ e $\varepsilon_{mf} = 0,420$.

3.4.2 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas na Região 1 para o intervalo de integração de $z_1 = 0$ até $z_1 = L$ são:

$$u(z_1=0) = u_{\text{exp}}$$

$$v(z_1=0) = 0 \text{ m/s}$$

$$\varepsilon(z_1=0) = 1$$

A velocidade dos sólidos assume valor igual a zero no início, considerando que o movimento dos sólidos se inicia a partir da entrada da base do alimentador ($z_1 = 0$) e para a porosidade supondo que não existe fração de sólidos na base do mesmo, sendo desta forma igual a um. Com base nessas condições de contorno e nas equações propostas por Marthur e Epstein (1964) são obtidos os resultados simulados de velocidade do fluido, velocidade dos sólidos e porosidade na Região 1, os quais foram utilizados como condição de contorno na Região 2. No intervalo de integração onde $z = z_0$ até $z = L$, tem-se:

$$u(z_1=z_0) = u_{sim}$$

$$v(z_1=z_0) = v_{sim}$$

$$\varepsilon(z_1=z_0) = \varepsilon_{sim}$$

Neste trabalho não foram obtidos os resultados simulados de pressão na Região 1. Sendo assim, é necessária a obtenção de uma condição de contorno para a pressão na entrada da Região 2, esta é baseada na condição conhecida na saída do tubo de transporte ($P=P_{atm}$).

3.4.3. Solução do sistema de equações diferenciais

O modelo é constituído por quatro equações diferenciais ordinárias, que conjuntamente com as equações constitutivas foram resolvidas numericamente utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª e 5ª ordem com passo variável. Para isso uma rotina computacional foi desenvolvida utilizando o programa MatLab ®. A solução do modelo foi

baseada nas condições operacionais obtidas experimentalmente, tendo-se medido as vazões volumétricas do ar e as vazões mássicas dos sólidos para efetuar a integração das variáveis.

Como não foi obtida a pressão na entrada do tubo, foi incorporado ao programa o método da bissecção para calcular a condição de contorno da pressão na entrada do tubo a partir da saída do mesmo. Para isso admitiu-se inicialmente dois valores, um máximo e um mínimo. A partir desses dois valores o programa realiza iterações até que seja encontrado o valor estimado, que no caso foi o valor da pressão atmosférica $P_{\text{atm}} = 0$.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo se apresenta e se discute os resultados obtidos neste trabalho. Para facilitar a compreensão, os resultados foram divididos nos seguintes itens: análise fluidodinâmica para cada z_0 ; resultados simulados; análise térmica, e análise da evaporação de água.

4.1. Análise Fluidodinâmica

A análise fluidodinâmica iniciou-se com a obtenção das curvas características no equipamento operando com sólidos para os z_0 utilizados.

4.1.1. Curvas características

A obtenção destas curvas foi importante para identificar a velocidade de mínimo transporte estável dos sólidos em diferentes z_0 . Com base na determinação desta velocidade foram estabelecidas as condições operacionais para analisar a vazão de sólidos, a pressão estática e os gradientes de pressão. A Figura 4.1 apresenta as curvas de queda de pressão e os desvios em função da velocidade do ar para z_0 iguais a 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 cm, respectivamente.

Observa-se que a queda de pressão aumenta significativamente com o aumento da velocidade do ar até um valor máximo com um comportamento igual ao de um leito fixo. Em seguida o início do transporte ocorre de maneira instável apresentando um comportamento inverso ao observado inicialmente, ou seja, a queda de pressão diminui com o aumento da velocidade do ar. Além disso, pode-se observar também que a redução da queda

de pressão proporciona elevadas oscilações, representadas pelos desvios. Isso provavelmente aconteceu por que a velocidade do ar ainda devia estar abaixo da velocidade necessária para transportar os sólidos, resultando na instabilidade gerada. Devido a este comportamento essa região é conhecida como região instável. Aumentando mais a velocidade do ar tem-se início o transporte estável dos sólidos. Nesta região a queda de pressão oscila pouco e os desvios praticamente não são observados. O fato das curvas apresentarem este comportamento tornou possível delimitar essas regiões a partir de uma linha vertical tracejada. Desta forma, foi possível identificar visualmente a velocidade do ar em que foi verificado o início do transporte estável dos sólidos, a qual foi denominada como velocidade de mínimo transporte estável dos sólidos.

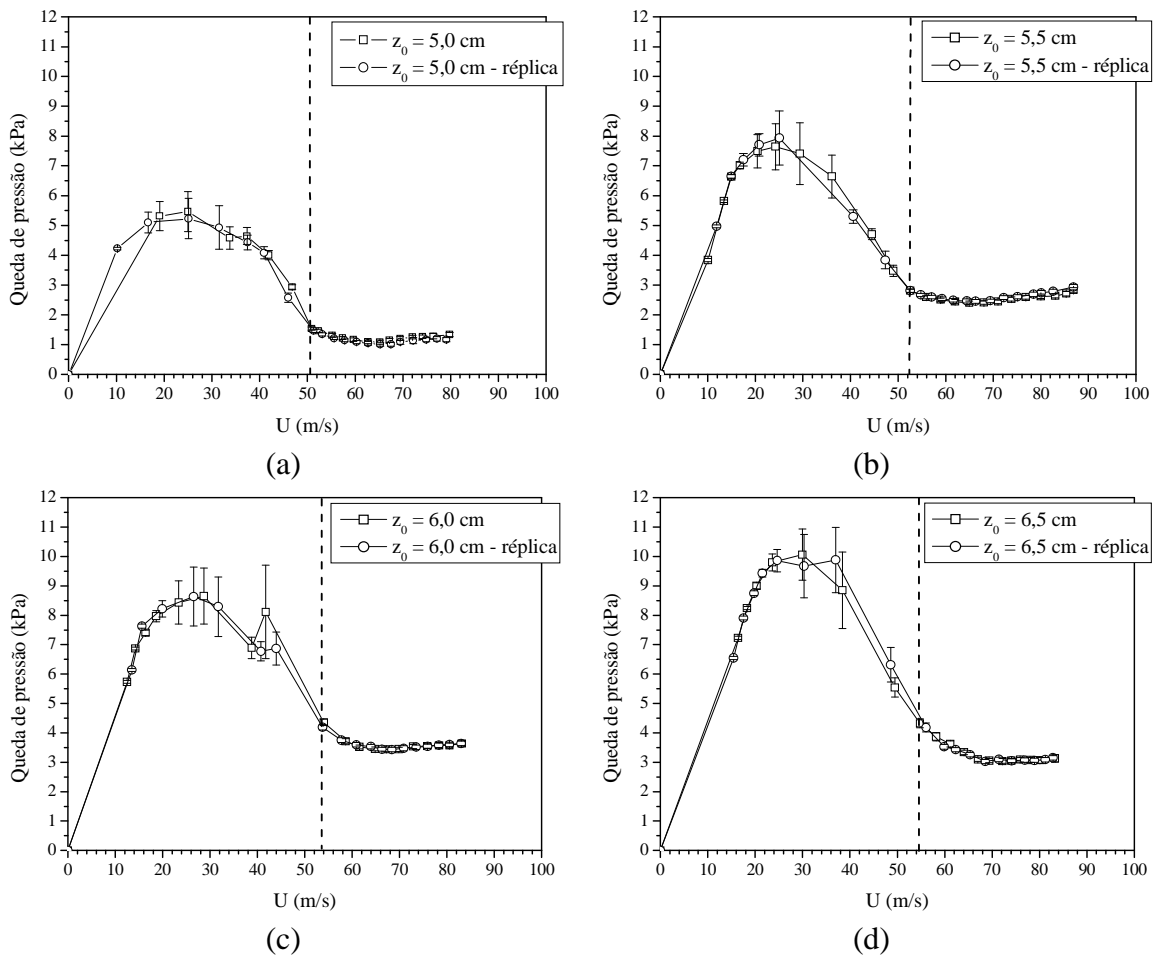


Figura 4.1: Queda de pressão em função da velocidade do ar para: a) $z_0 = 5,0$; b) $z_0 = 5,5$; c) $z_0 = 6,0$ e d) $z_0 = 6,5$ cm.

As réplicas apresentadas mostram que os resultados foram reprodutíveis para cada condição operacional. Analisando-se as curvas conjuntamente para os diferentes z_0 observa-se que os valores máximos de queda de pressão aumentam com o aumento de z_0 , conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores máximos de queda de pressão para cada z_0 utilizado.

z_0 (cm)	ΔP_{\max} (kPa)
5,0	$5,50 \pm 0,680$
5,5	$8,00 \pm 0,900$
6,0	$8,70 \pm 0,950$
6,5	$10,00 \pm 0,871$

Isso ocorreu devido ao aumento de z_0 promover uma altura do leito estático de sólidos maior, aumentando desta forma a energia necessária para romper o leito, resultando no comportamento apresentado. Comportamento este compatível com aquele obtido por Ferreira e Freire (1992).

4.1.2. Vazão de sólidos

Os dados de vazão de sólidos foram obtidos em função da velocidade do ar para z_0 iguais a 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 cm, conforme mostra a Figura 4.2. Estes dados mostraram que o aumento de z_0 influenciou no aumento da vazão de sólidos. Provavelmente, isto aconteceu devido o aumento de z_0 facilitar o escoamento dos sólidos pelo aumento da área da região de alimentação. Com isso, maiores quantidade de sólidos foram transportados, resultando no comportamento apresentado. Acredita-se que exista um limite para que sejam transportados maiores quantidade de sólidos com o aumento de z_0 , como foi observado para z_0

maior que 6,0 cm, em que não se observou maiores acréscimos nas vazões de sólidos. O comportamento apresentado pela Figura 4.2 foi observado também por diversos autores, utilizando-se equipamentos similares, conforme pode ser verificado nos trabalhos de Ferreira e Freire (1992); Littman *et al.*(1993); Garic *et al.* (1995) e Silva (1997).

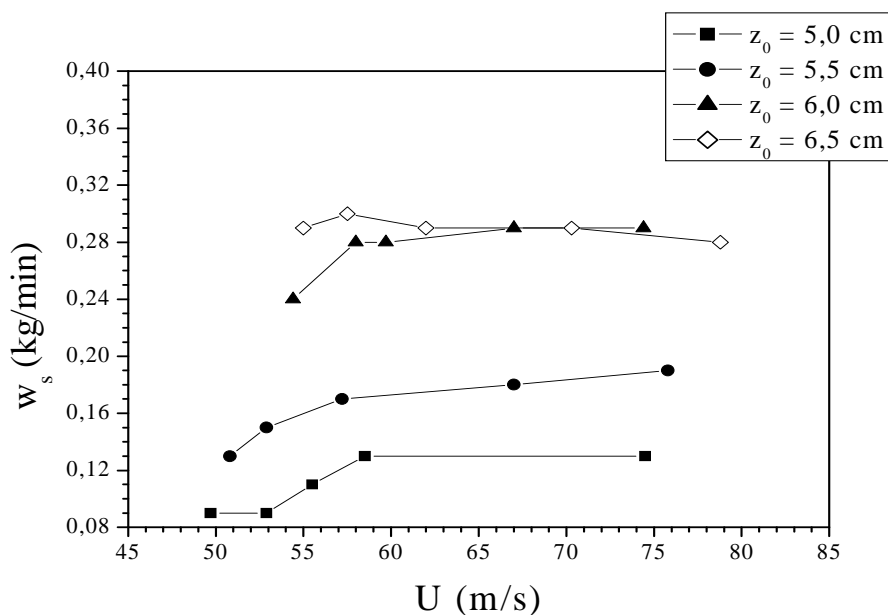


Figura 4.2: Vazão de sólidos em função da velocidade do ar parametrizado em z_0 .

A dependência da vazão de sólidos com a velocidade do ar tende a diminuir com o aumento de z_0 . Para z_0 iguais a 5,0 e 5,5 cm ocorreu um aumento de 45% para a faixa de velocidade utilizada, a qual variou entre 50,0 e 74,0 m/s, aproximadamente. Já para z_0 igual a 6,0 cm o aumento foi menor, em torno de 21% para uma faixa de velocidade do ar menor, abaixo de 58,0 m/s. Por outro lado, para z_0 igual a 6,5 cm a vazão de sólidos manteve-se praticamente constante para toda a velocidade do ar utilizada. O aumento verificado na vazão de sólidos com o aumento da velocidade do ar é justificado pelo fato de serem arrastadas maiores quantidades de sólidos para o tubo de transporte quando aumentada a vazão do ar de entrada. Já para o comportamento em que a vazão de sólidos manteve-se

praticamente constante isso ocorre provavelmente por que o ar desviado para a região anular consegue balancear a força peso, com isto o escoamento dos sólidos para a entrada do leito fica praticamente constante.

As condições experimentais para a variação de z_0 ficaram limitadas entre 5,0 e 6,5 cm. Valores menores que 5,0 cm não foram testados, uma vez que, a entrada do tubo praticamente encostava-se à parede cônica do alimentador, impedindo o escoamento dos sólidos para a região de alimentação. Para valores maiores que 6,5 cm não foi possível obter o transporte dos sólidos com a vazão de ar fornecida pelo soprador.

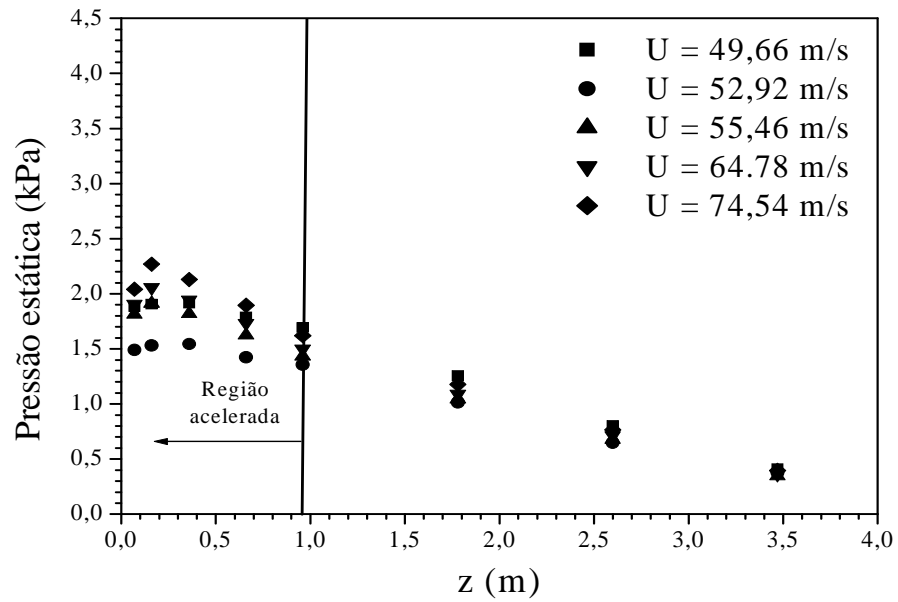
4.1.3. Pressão estática

A Figura 4.3 apresenta os valores de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para z_0 iguais a 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 cm, respectivamente. O aumento de z_0 fez com que a pressão estática aumentasse em todas as posições axiais do tubo. Esse comportamento já era esperado devido o aumento da contribuição da força peso em função da quantidade de sólidos transportada no tubo de transporte, tornando-se maior com o aumento de z_0 . Este fato foi verificado através dos dados de vazão de sólidos em relação a z_0 .

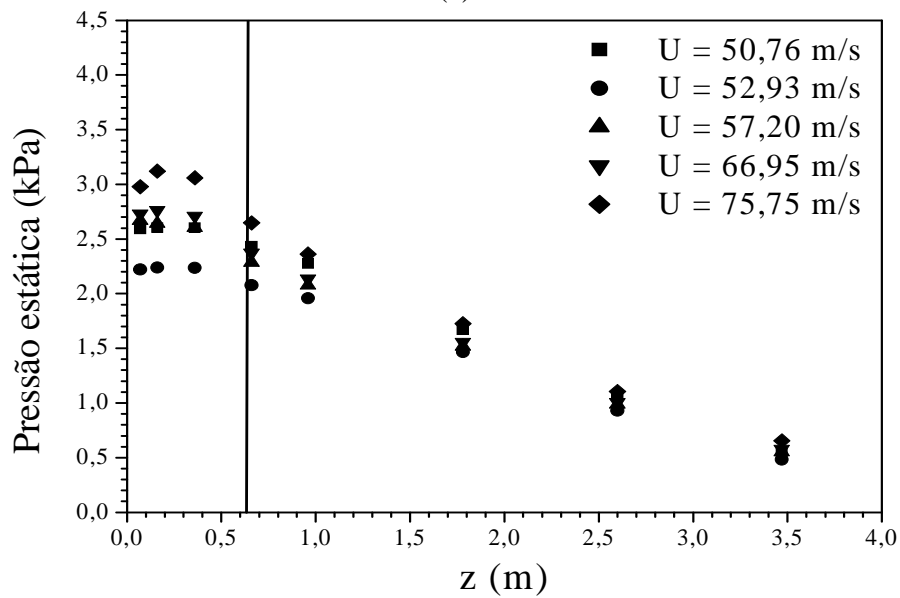
Observa-se também que para essas condições operacionais a pressão estática diminuiu com o aumento do comprimento do tubo de transporte. Este comportamento já era esperado, uma vez que na saída do equipamento a pressão estática é igual a pressão atmosférica, ou seja, a pressão manométrica é igual a zero.

Entretanto, observa-se que ocorreu um aumento acentuado da pressão situada na região entre z igual a zero até z igual a 0,16 m. Este comportamento pode ser justificado, pelo fato do bocal redutor alterar a configuração de entrada, reduzindo a área de escoamento, o que provoca um aumento da velocidade (Kavassaki, 1985). Assim, as medidas de pressão

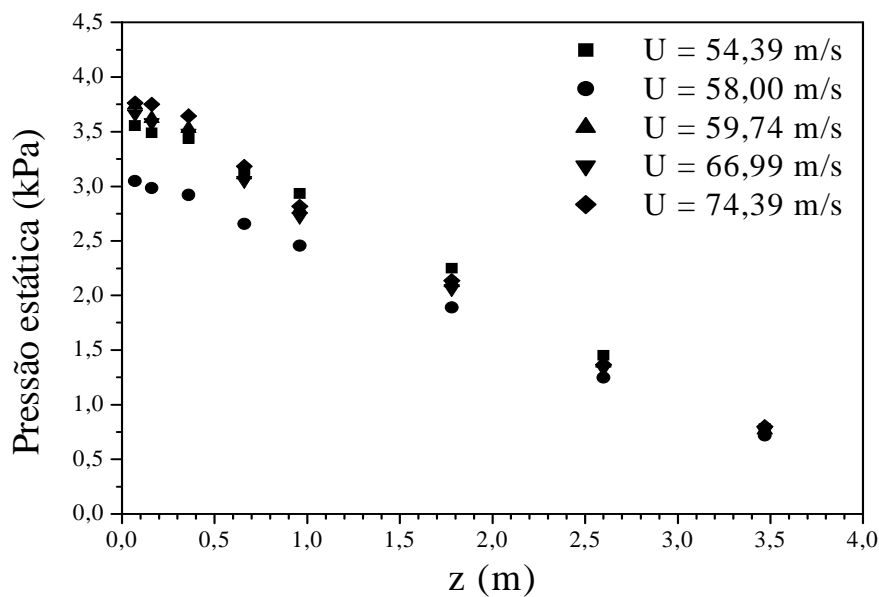
estática obtidas na região de entrada do tubo de transporte, onde observou-se inicialmente o aumento de pressão não são representativas da pressão média naquela secção transversal, justificando o comportamento atípico apresentado na Figura 4.3.



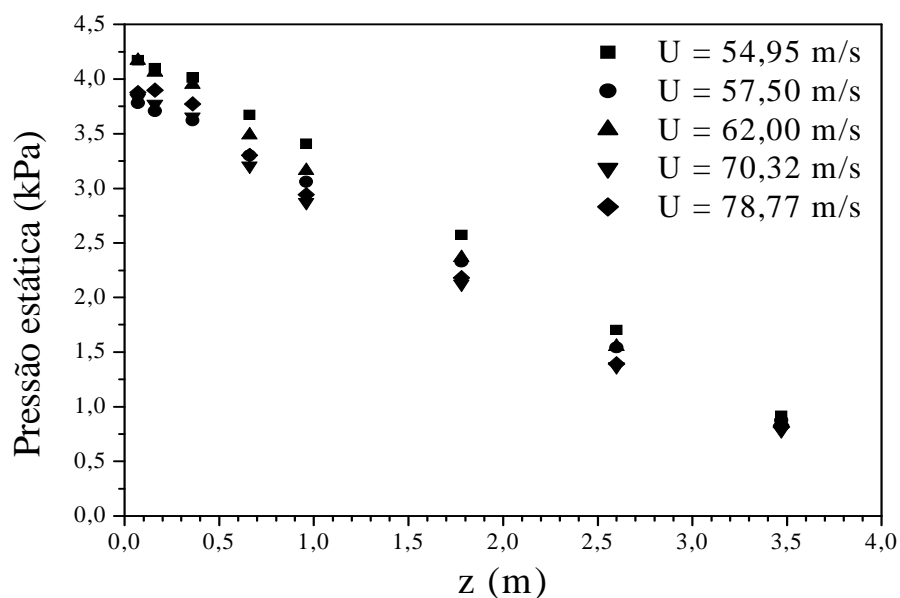
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3: Pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para: a) $z_0 = 5,0$; b) $z_0 = 5,5$; c) $z_0 = 6,0$ e d) $z_0 = 6,5$ cm.

O aumento de z_0 influenciou no comportamento apresentado na região acelerada, onde foi observado o aumento acentuado da pressão na primeira tomada de pressão, contribuindo para que os perfis axiais de pressão tornar-se lineares desde z igual a zero.

Conforme foi visto na Revisão Bibliográfica a determinação do comprimento de entrada nesta região pode ser realizada através de correlações encontradas na literatura. Alguns autores como Silva (1984) e Costa (2001) aplicaram as equações de Rose e Duckorth (1969) e Enick Klinzing, (1985), os quais obtiveram resultados incoerentes, com valores muito superiores aos experimentais. Os autores atribuíram este fato ao bocal redutor, uma vez que este não foi considerado na obtenção de nenhuma das correlações utilizadas. No caso específico desse trabalho optou-se por estimar o comprimento de entrada realizando-se ajustes lineares aos dados experimentais de pressão, realizando o ajuste polinomial de primeira ordem. Cabe ressaltar que esse método não determina com exatidão o valor do comprimento de entrada em todas as condições utilizadas, mas permite identificar a partir de qual posição do tubo é verificado comportamento linear.

Para z_0 igual a 5,0 cm uma observação relevante foi o fato que, em nenhuma das velocidades utilizadas, o comprimento de entrada foi maior que a altura da quinta tomada de pressão ($z = 0,96$ m), a qual apresentou os maiores coeficientes de correlação. Assim, o comprimento desta tomada de pressão foi considerado como um valor que garante que o escoamento está fora da região acelerada para as condições utilizadas. A linha vertical apresentada na Figura 4.3 está fixada neste valor, o qual equivale a 1,0 m de comprimento, aproximadamente. A partir desse valor observa-se que os perfis de pressão apresentaram comportamentos lineares até o final do comprimento do tubo de transporte.

Comparando os perfis de pressão apresentados para z_0 igual a 5,0 cm com os perfis de pressão dos demais z_0 , verifica-se que qualitativamente o comportamento é semelhante para todos os casos. No entanto, analisando mais detalhadamente é possível verificar que, os comprimentos de entrada tornaram-se menores com o aumento de z_0 . Provavelmente, devido ao escoamento encontrar-se mais uniformemente distribuído próximo à entrada do tubo. Com isso, a medida de pressão torna-se mais representativa do escoamento

na secção transversal. Isso também ajuda a explicar o fato dos perfis de pressão estática apresentarem um comportamento linear desde z igual a zero para z_0 iguais a 6,0 e 6,5 cm.

Ainda, na Figura 4.3 é possível observar que para todos os z_0 analisados a pressão estática tende a reduzir em algumas posições axiais e em seguida aumenta como o aumento da velocidade do ar. Esse comportamento também foi observado por Ferreira (1996) e Costa (2001). Isto pode ser justificado por uma mudança no regime de escoamento de regime denso para o diluído. Esta mudança pode ser analisada através do gráfico de gradiente de pressão em função da velocidade do ar.

4.1.4. Gradiente de pressão

O gradiente de pressão em função da velocidade do ar é apresentado na Figura 4.4. Analisando o comportamento do gráfico apresentado para z_0 igual a 5,0 cm observa-se que os valores de gradiente de pressão reduzem com o aumento da velocidade do ar até um mínimo de gradiente pressão. A partir desse ponto o gradiente de pressão aumenta com o aumento da velocidade do ar. O valor da velocidade do ar em que iniciou-se o aumento do gradiente de pressão foi igual a 60,0 m/s. Esse valor foi obtido utilizando o cálculo da primeira derivada nos dados de gradiente de pressão em função da velocidade do ar, sendo o mínimo considerado onde a derivada é igual a zero.

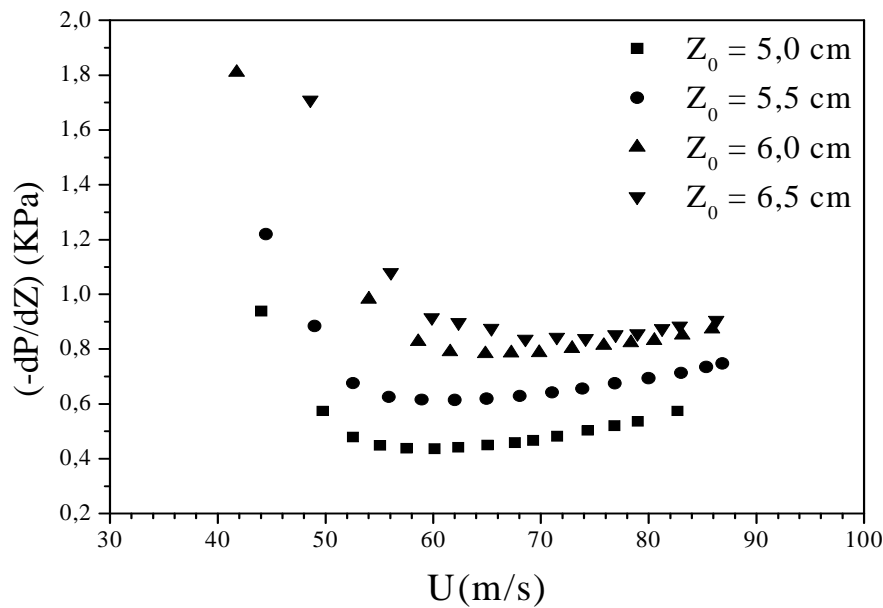


Figura 4.4: Gradiente de pressão em função da velocidade do parametrizado em z_0 .

A partir disso, pode-se identificar a região do escoamento do regime denso e do diluído. Para valores de velocidade do ar abaixo de 60,0 m/s encontra-se o escoamento em regime denso e para velocidade do ar maior encontra-se o escoamento em regime diluído. Para $5,5 \leq z_0 \leq 6,5$ o comportamento apresentado foi semelhante ao de $z_0 = 5,0$ cm. Observa-se também que os dados de gradiente de pressão reduziram até atingir o ponto mínimo, os quais a partir disso aumentaram com o aumento da velocidade do ar.

Os dados de gradiente de pressão em função da velocidade do ar apresentados na Figura 4.4 assemelham-se aos gráficos obtidos no transporte pneumático em que a vazão de sólidos é mantida constante. Esse comportamento é justificado pela contribuição conjunta e diferenciada de duas forças: a força resistiva do peso no meio poroso e a força de atrito fluido-parede. Para baixas velocidades do ar a força resistiva é maior devido às altas concentrações de sólidos. À medida que aumenta a velocidade do ar a concentração de sólidos diminui até atingir a velocidade de mínimo gradiente de pressão (U_{\min}). A partir dessa velocidade a força de atrito fluido-parede passa a predominar com o aumento da velocidade do ar (Marcus *et al.* 1990).

Além disso, pode-se ainda observar na Figura 4.4 que para a mesma velocidade do ar os mínimos de gradiente de pressão aumentaram com o aumento de z_0 . Esse comportamento era esperado devido ao transporte de sólidos se tornar maior, traduzindo-se no aumento das forças peso e de atrito fluido-parede com o aumento de z_0 , conforme já foi observado através dos dados de vazão de sólidos e pressão estática discutido anteriormente. A Tabela 4.2 apresenta os valores de U_{\min} para todos os mínimos de gradiente de pressão $-dP/dZ_{\min}$ obtidos para cada z_0 analisado.

Tabela 4.2: Valores de $-dP/dZ_{\min}$ e U_{\min} .

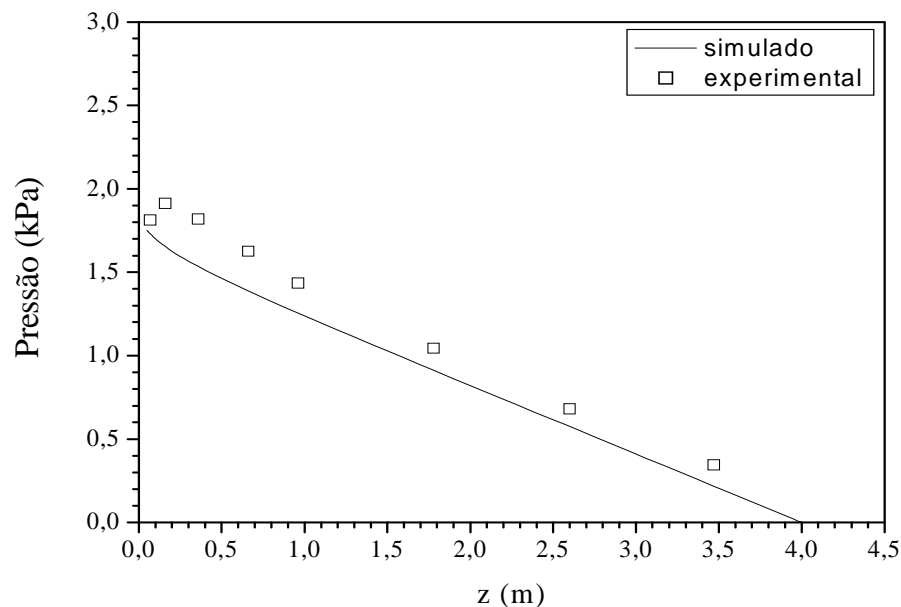
z_0 (cm)	$-dP/dZ_{\min}$ (kPa)	U_{\min} (m/s)
5,0	0,43	60,0
5,5	0,61	62,0
6,0	0,79	67,0
6,5	0,85	71,5

O fato de U_{\min} e $-dP/dz$ aumentarem com o aumento de z_0 foi também observado por Silva (1997), que chamou a atenção para o fato de que o ponto de mínimo dos gráficos de gradiente de pressão em função da velocidade do ar pode mudar dependendo da vazão de sólidos. Isto foi verificado para o alimentador tipo jorro, onde a vazão de sólidos controlada por z_0 apresentou valores de mínimos diferentes, conforme apresentado na Tabela 4.2. Da mesma forma que para z_0 igual a 5,0 cm os gráficos de gradiente de pressão obtidos para os demais z_0 demonstraram ser adequado para identificar a região de escoamento do leito denso e diluído.

4.2. Resultados Simulados

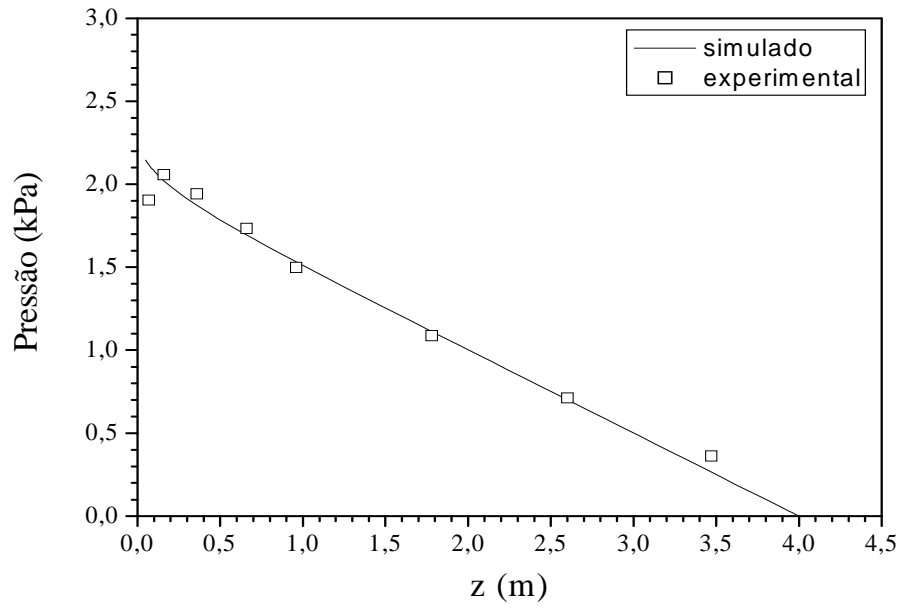
O modelo utilizado na simulação foi capaz de prever o comportamento fluidodinâmico no tubo de transporte utilizando os resultados simulados de pressão estática, porosidade e velocidade dos sólidos. Os resultados simulados da simulação para as diferentes condições operacionais utilizadas foram comparados com os dados experimentais de pressão estática e valores de porosidade média obtidos no escoamento desenvolvido.

Os resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte são apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Estes mostram que os resultados simulados apresentaram valores próximos aos dados experimentais para valores de z maiores que 0,16 m.



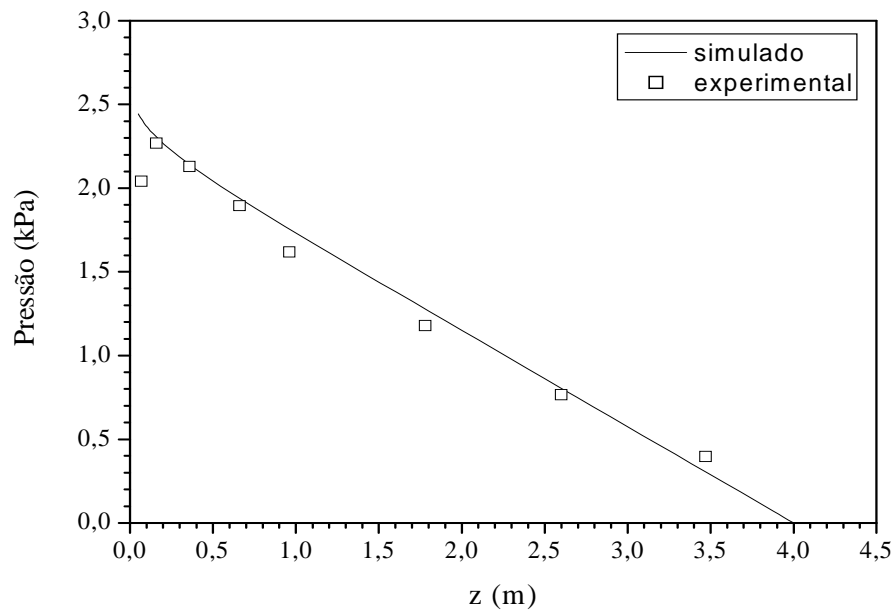
(a)

Figura 4.5: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a $0,039 \text{ m}^3/\text{s}$.



(b)

Figura 4.6: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a 0,045 m³/s.



(c)

Figura 4.7: Resultados simulados e experimentais de pressão estática em função do comprimento do tubo de transporte para condição de entrada igual a 0,052 m³/s.

Em relação às condições de entrada observa-se que os resultados simulados apresentaram boa concordância para as maiores vazões do ar de entrada, apresentando um desvio médio, em torno de 5% em relação aos resultados experimentais. Isto ocorreu provavelmente porque o modelo foi desenvolvido para analisar o escoamento em fase diluída. No caso da vazão do ar de entrada igual a $0,0039 \text{ m}^3/\text{s}$ a velocidade do ar correspondente é $55,5 \text{ m/s}$. Para este valor de velocidade do ar foi verificado através da Figura 4.4 que encontra-se no escoamento do regime denso.

Para o comprimento do tubo de transporte menor que $0,16 \text{ m}$ os resultados experimentais mostram um aumento acentuado da pressão. Provavelmente, isto pode estar ocorrendo devido o escoamento gás-sólido apresentar-se, conforme mostra a Figura 4.8 (a). No caso dos resultados simulados, esse aumento da pressão não foi observado, mostrando que o modelo considera o escoamento gás-sólido desenvolvido desde a entrada do tubo de transporte até seu comprimento final, como mostra a Figura 4.8 (b).

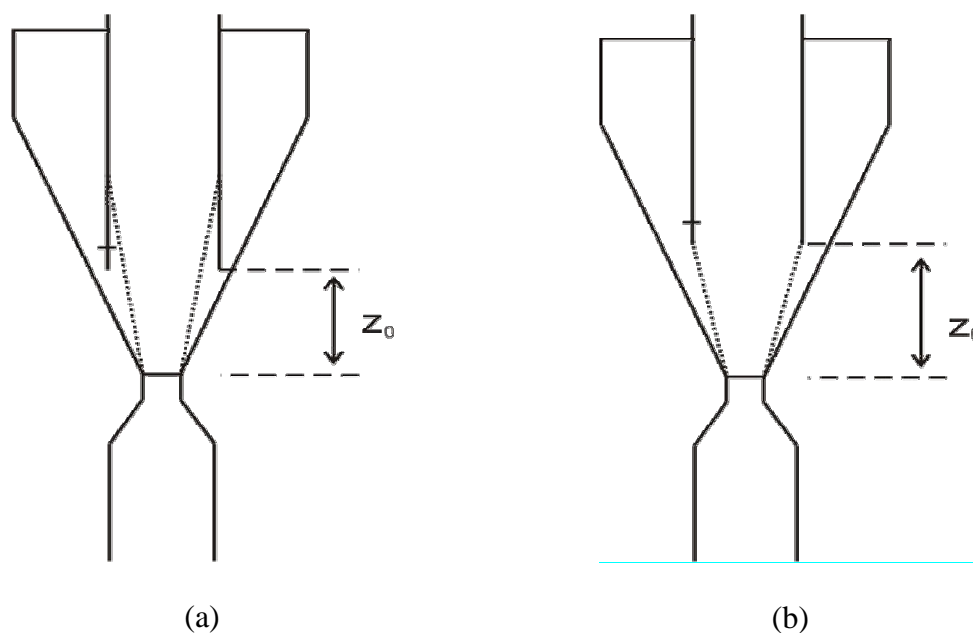
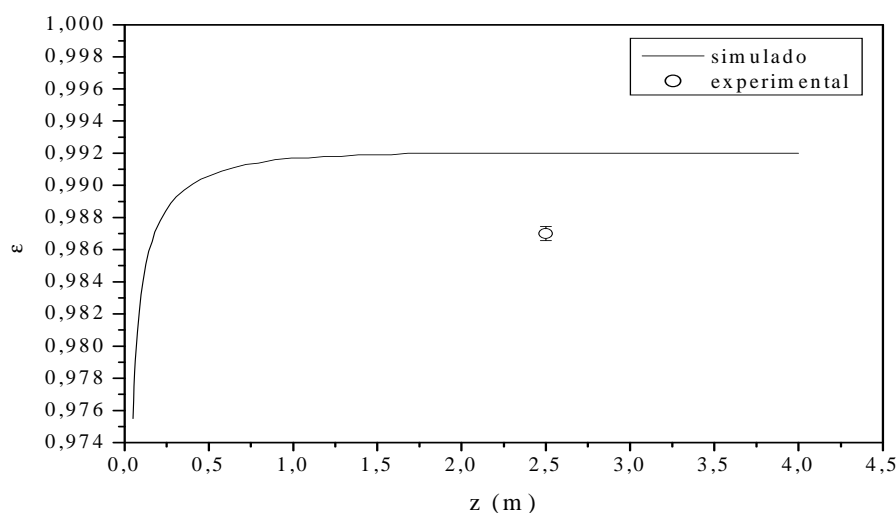


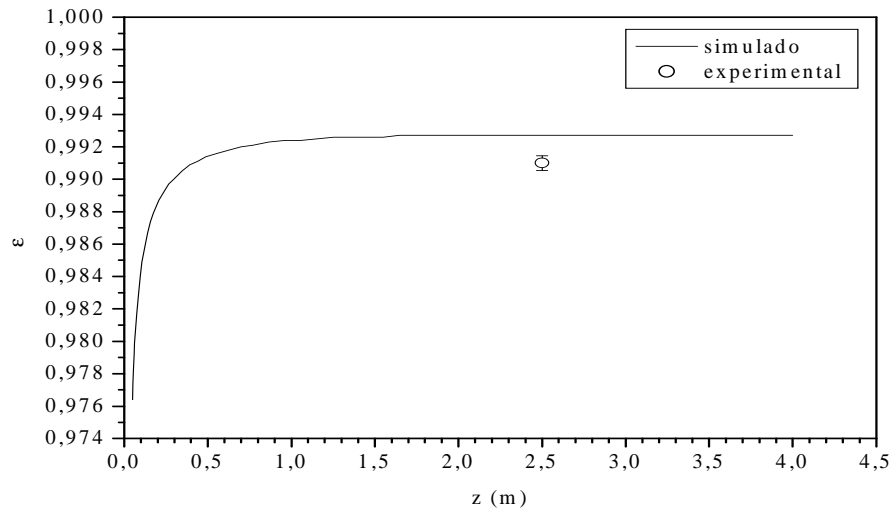
Figura 4.8: Diagramas esquemáticos do comportamento apresentado na região da entrada do tubo de transporte, a) dados experimentais e b) resultados simulados.

A Figura 4.9 apresenta os resultados simulados da porosidade em função do comprimento do tubo de transporte e os valores médios experimentais de porosidade. Pode-se observar a variação acentuada na região acelerada do tubo para os resultados simulados. A partir disso, o escoamento torna-se desenvolvido e a porosidade não se altera. Na região acelerada, para uma mesma vazão de ar, isso ocorre devido a diminuição da concentração volumétrica dos sólidos transportados com o aumento do comprimento do tubo de transporte.

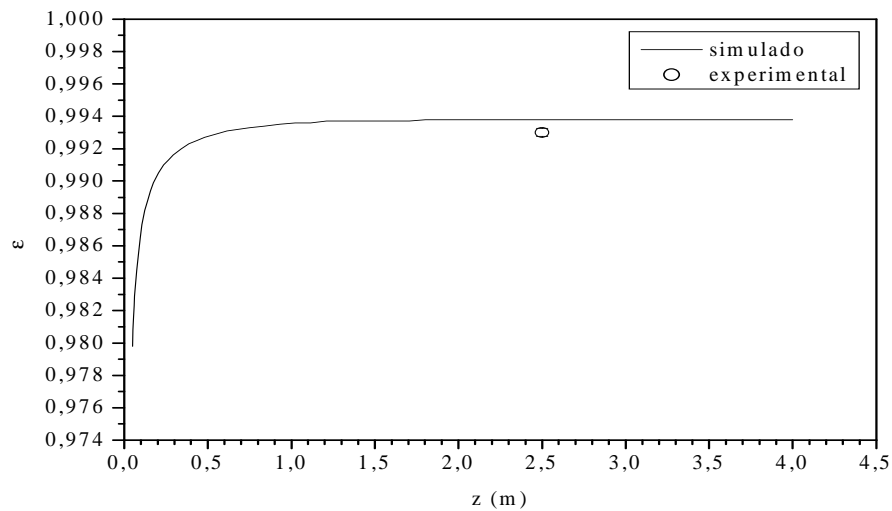
Analisando a região não-acelerada os gráficos mostram que os resultados simulados de porosidade se aproximaram mais aos valores de porosidade média obtido experimentalmente para a maior vazão do ar de entrada. Os dados experimentais de porosidade média apresentaram desvios pequenos, os quais não foram maiores que $\pm 0,00044$ mostrando que as válvulas guilhotinas estão operando em boas condições cessando simultaneamente o escoamento gás-sólido. Isso reforça o que já foi discutido anteriormente nos dados simulados de pressão, em que o modelo representa melhor o comportamento fluidodinâmico no escoamento diluído.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9: Resultados simulados e valores médios experimentais de porosidade no tubo de transporte em função da altura do tubo de transporte para as condições de operação iguais a: a) $0,039 \text{ m}^3/\text{s}$; b) $0,045 \text{ m}^3/\text{s}$ e c) $0,052 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.10 apresenta somente os resultados simulados de velocidade dos sólidos em função do comprimento do tubo de transporte, parametrizados na velocidade do ar. O comportamento foi semelhante ao obtido para a porosidade, neste caso, observa-se a variação acentuada da velocidade dos sólidos na região acelerada. Em seguida uma região com velocidades praticamente constantes. Além disso, a velocidade dos sólidos tornou-se

maior com o aumento da velocidade do ar, o que já era esperado, pois aumentando a vazão do ar de entrada consequentemente aumenta a quantidade de transferência do ar para os sólidos.

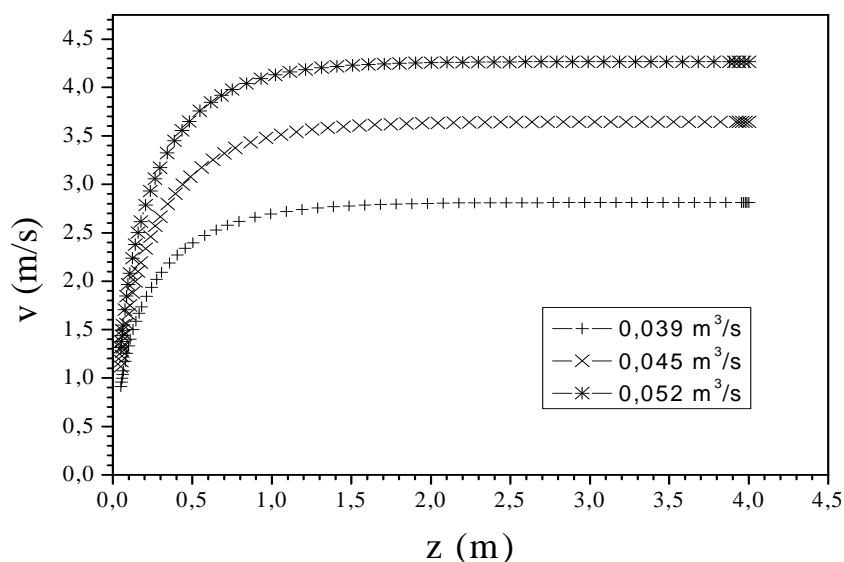


Figura 4.10: Resultados simulados da velocidade dos sólidos em função comprimento do tubo de transporte.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram que a variação acentuada nos resultados simulados de velocidades e da porosidade dos sólidos significa que o escoamento não encontra-se desenvolvido naquela região, ou seja, existe variação dos gradientes de velocidades e de concentração dos sólidos, caracterizando a região acelerada no tubo de transporte.

Os resultados obtidos das simulações com o modelo proposto por Zorana *et al.* (2004) mostraram que este modelo foi capaz de prever satisfatoriamente o comportamento fluidodinâmico para as condições de entrada utilizada. Nota-se também que, os resultados simulados apresentaram comportamentos qualitativos semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Littman *et al.* 1993; Grbavic *et al.* 1997; Zorana *et al.* 2004. Desses autores Grbavic *et al.* (1997) apresentaram um trabalho utilizando equipamento e condições

operacionais mais próximas do trabalho em questão. Os autores aplicaram um modelo similar ao utilizado no presente trabalho e observaram que os resultados simulados de pressão, porosidade e velocidade dos sólidos foram satisfatórios quando verificados com os dados experimentais. Outros trabalhos como os de Grbavic *et al.* (1992) e Garic *et al.* (1995) observaram que as equações da continuidade e quantidade movimento proposto por Capes e Nakamura (1973) e o modelo variacional proposto por Grbavic *et al.* (1991) podem ser aplicados para o comportamento fluidodinâmico do escoamento em fase diluída em transportes pneumáticos utilizando partículas grossas.

Cabe ressaltar que as condições de contorno utilizadas para resolver o modelo no tubo de transporte foram obtidas a partir da solução do modelo proposto por Marthur e Epstein (1974) na região de alimentação dos sólidos de um leito de jorro. A solução desse modelo considerou a variação do diâmetro entre a base do alimentador e a entrada do tubo de transporte. Portanto, como os resultados simulados no tubo de transporte foram fisicamente consistentes, entende-se que os resultados simulados na região de alimentação também foram satisfatórios.

4.3. Análise Térmica

Neste item serão apresentados os resultados referentes à influência da temperatura do ar de entrada no comportamento fluidodinâmico e térmico do sistema. Para isso foram analisadas duas temperaturas do ar de entrada, 80 e 100°C. O comportamento fluidodinâmico foi observado através das curvas características do equipamento operando vazio e com sólidos, assim como os valores de porosidade média no tubo de transporte para o escoamento desenvolvido. Para o comportamento térmico foram analisados os perfis de temperatura do ar ao longo do tubo de transporte. Os ensaios fluidodinâmicos e térmicos

foram realizados para z_0 igual a 5,0 cm, o qual já vem sendo adotado e analisado nos trabalhos de Ferreira Freire (1992) e Costa (2001).

4.3.1. Curvas características em função da temperatura

A Figura 4.11 apresenta as curvas características para o equipamento operando vazio e com sólidos, respectivamente. O comportamento fluidodinâmico apresentado nesta figura concordam com os comportamentos apresentados nos trabalhos de Ferreira (1991) e Ferreira e Freire (1992).

Para a Figura 4.11 (a) o comportamento apresentado mostra uma pequena variação na queda de pressão em relação as diferentes temperaturas do ar de entrada utilizada, a qual pode ser desconsiderada, uma vez que não foram significativas.

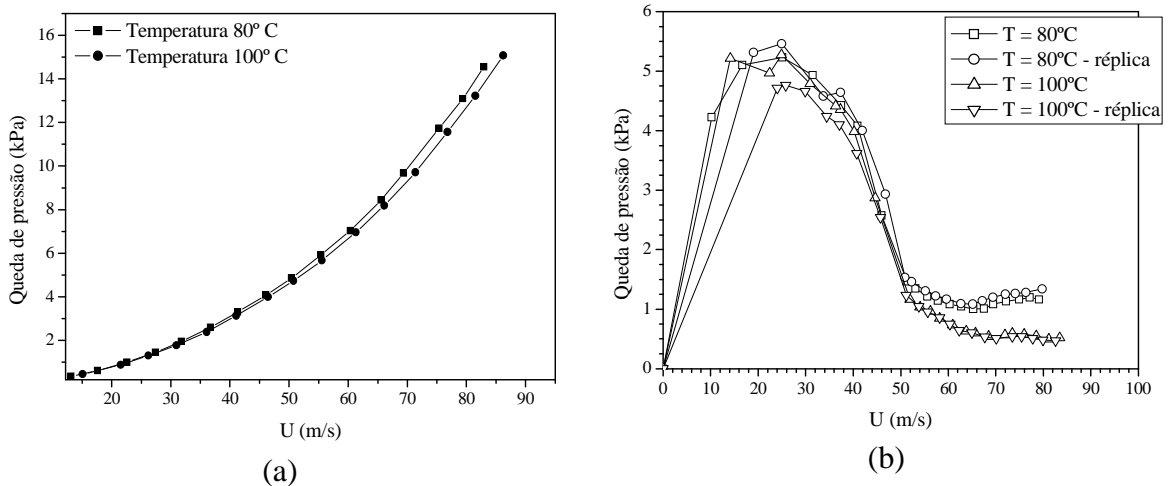


Figura 4.11: Queda de pressão em função da velocidade do ar a temperatura de 80 e 100°C do equipamento operando a) vazio e b) com sólidos.

Já para o comportamento apresentado na Figura 4.11 (b) a influência da temperatura foi mais significativa. Observa-se que o transporte dos sólidos tende a ser

efetuado exigindo menor energia do sistema, o qual é verificado com a redução na queda de pressão para a temperatura do ar de entrada igual a 100°C. Isto provavelmente ocorreu devido às propriedades físicas do ar terem variado com o aumento da temperatura, influenciando no transporte dos sólidos. Com base nas curvas características apresentadas na Figura 4.11 (b) para as duas temperaturas foi possível especificar as velocidades do ar para analisar a porosidade média no tubo de transporte e a temperatura do ar ao longo do tubo de transporte, conforme será apresentado no próximo item.

4.3.2. Porosidade média

Foram obtidos os dados de porosidade média no escoamento desenvolvido para as duas temperaturas do ar de entrada utilizadas, conforme mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Porosidade média em função da velocidade do ar para as temperaturas do ar de entrada iguais a 80 e 100°C

T(°C)	Ensaio	U (m/s)	ϵ	T(°C)	Ensaio	U (m/s)	ϵ
80	1	55,4	0,987	100	1	60,5	0,990
	2	55,6	0,987		2	60,3	0,991
	3	55,5	0,987		3	60,8	0,990
80	1	64,7	0,991	100	1	71,2	0,992
	2	65,0	0,990		2	71,0	0,992
	3	64,7	0,991		3	70,5	0,992
80	1	74,8	0,993	100	1	82,4	0,993
	2	74,4	0,993		2	82,2	0,993
	3	74,5	0,993		3	82,6	0,994
Média	1	55,5	0,987		1	60,5	0,990
Média	2	64,8	0,991		2	70,8	0,992
Média	3	74,5	0,993		3	82,4	0,993

Os resultados obtidos em triplicatas apresentaram boa reprodutibilidade para todas as condições operacionais utilizadas. A partir da média obtida para cada velocidade do

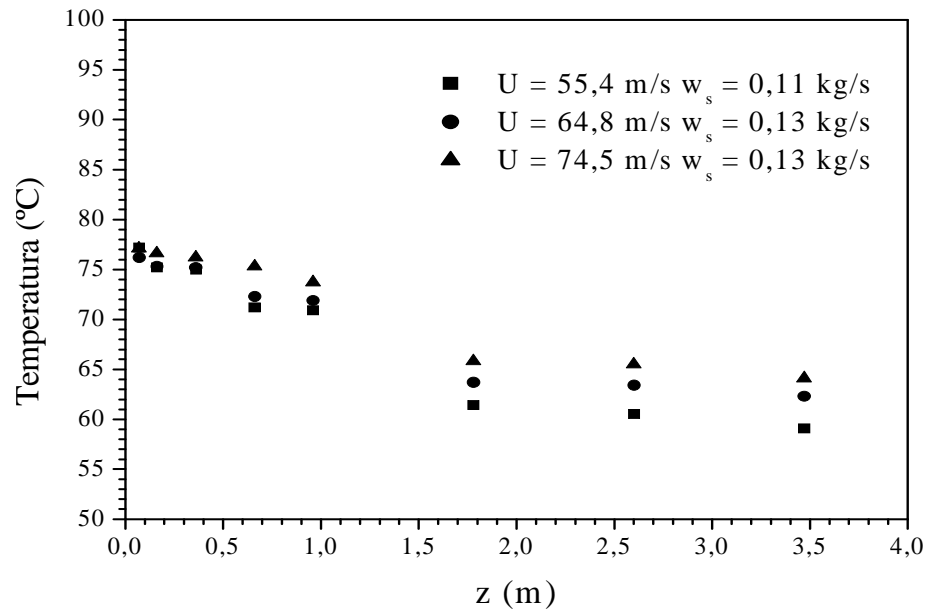
ar utilizada, observa-se que para as temperaturas de 80 e 100°C a porosidade aumenta ligeiramente com o aumento da velocidade do ar. Na faixa de temperatura utilizada a porosidade média apresentou valores praticamente constantes.

Esperava-se que para baixas velocidades do ar a porosidade média fosse menor do que o valor encontrado. Segundo Marcus *et al* (1990) a porosidade média no escoamento na fase densa deveria apresentar valores inferiores a 0,85. No caso deste trabalho, observando os dados de porosidade média apresentados na Tabela 4.3 pode-se dizer que o escoamento encontra-se diluído para todas as velocidades do ar utilizadas, uma vez que as médias obtidas das triplicatas foram superiores a 0,980. Entretanto, a discussão realizada não concordaria com os resultados obtidos dos gráficos de gradiente de pressão, apresentado na Figura 4.4, sendo que para z_0 igual a 5,0 cm e velocidade do ar em torno de 55,5 m/s o escoamento encontra-se no regime denso. Pelo critério do mínimo gradiente de pressão em função da velocidade do ar o valor de 55,5 m/s está no escoamento denso. Como pode ser observado nas informações de Marcus *et al.* (1990), o valor de 0,85 deve ser visto com muito cuidado quando se pretende delimitar as regiões do escoamento denso do diluído.

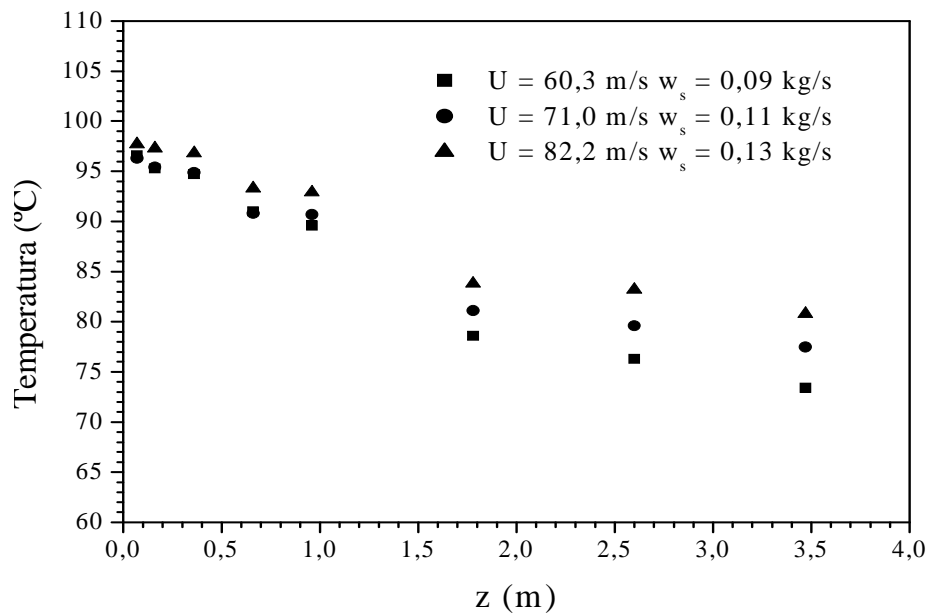
4.3.3. Temperatura do ar

A Figura 4.12 apresenta os perfis de temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para diferentes velocidades do ar e vazões de sólidos. Apesar das condições operacionais terem variado em relação às duas temperaturas, é possível observar que o aumento da temperatura do ar de entrada influenciou nos perfis de temperatura do ar, o que era esperado, uma vez que a energia térmica transportada torna-se maior com o aumento da temperatura. Além do aumento da temperatura do ar de entrada o aumento

conjunto da velocidade do ar e da vazão de sólidos também proporcionou aumento de energia fornecida ao sistema.



(a)



(b)

Figura 4.12: Temperatura do ar em função do comprimento do tubo de transporte para as velocidades utilizadas a: a) 80°C e b) 100°C .

Para ambas as temperaturas, 80 e 100°C os perfis apresentaram comportamentos semelhantes, isto é, diminui com o comprimento do tubo de transporte. Analisando detalhadamente os perfis, verifica-se que existe uma variação acentuada da temperatura na região entre z igual a 1,0 e 1,8 m do tubo. Isso pode ser explicado devido a configuração do equipamento, em que o comprimento do tubo em z menor que 1,0 m encontra-se localizado na região central do alimentador em contato com o leito de partículas aquecidas. Por outro lado, para z maior que 1,8 m, o tubo de transporte está localizado na parte externa do alimentador e com isolamento térmico.

4.4. Evaporação da Água

Foram obtidos resultados fluidodinâmicos e térmicos na entrada e no tubo de transporte a fim de investigar se o equipamento apresentava algum tipo de instabilidade na presença da fase líquida. Em princípio, os ensaios foram realizados também para as temperaturas do ar de entrada 80 e 100°C. No entanto, para o valor de 80°C foi verificado que o leito de partículas saturava rapidamente de água e isso prejudicava o transporte dos sólidos. Essa saturação não apresentou efeito significativo para a temperatura de 100°C. Então, optou-se por aumentar a temperatura do ar de entrada para 120°C. A esta temperatura não foi verificado nenhum sinal de instabilidade no equipamento. Desta forma, as temperaturas do ar de entrada utilizadas para analisar a evaporação foram 100 e 120°C. Além das temperaturas do ar de entrada foram utilizadas como condições operacionais as vazões de alimentação que variaram desde a mínima até a máxima que o sistema suportou, z_0 igual a 5,0 cm e velocidade do ar fixa em 72,0 m/s.

4.4.1. Análise dos dados de pressão

Os adimensionais da pressão na entrada do equipamento em função do tempo são apresentados na Figura 4.13.

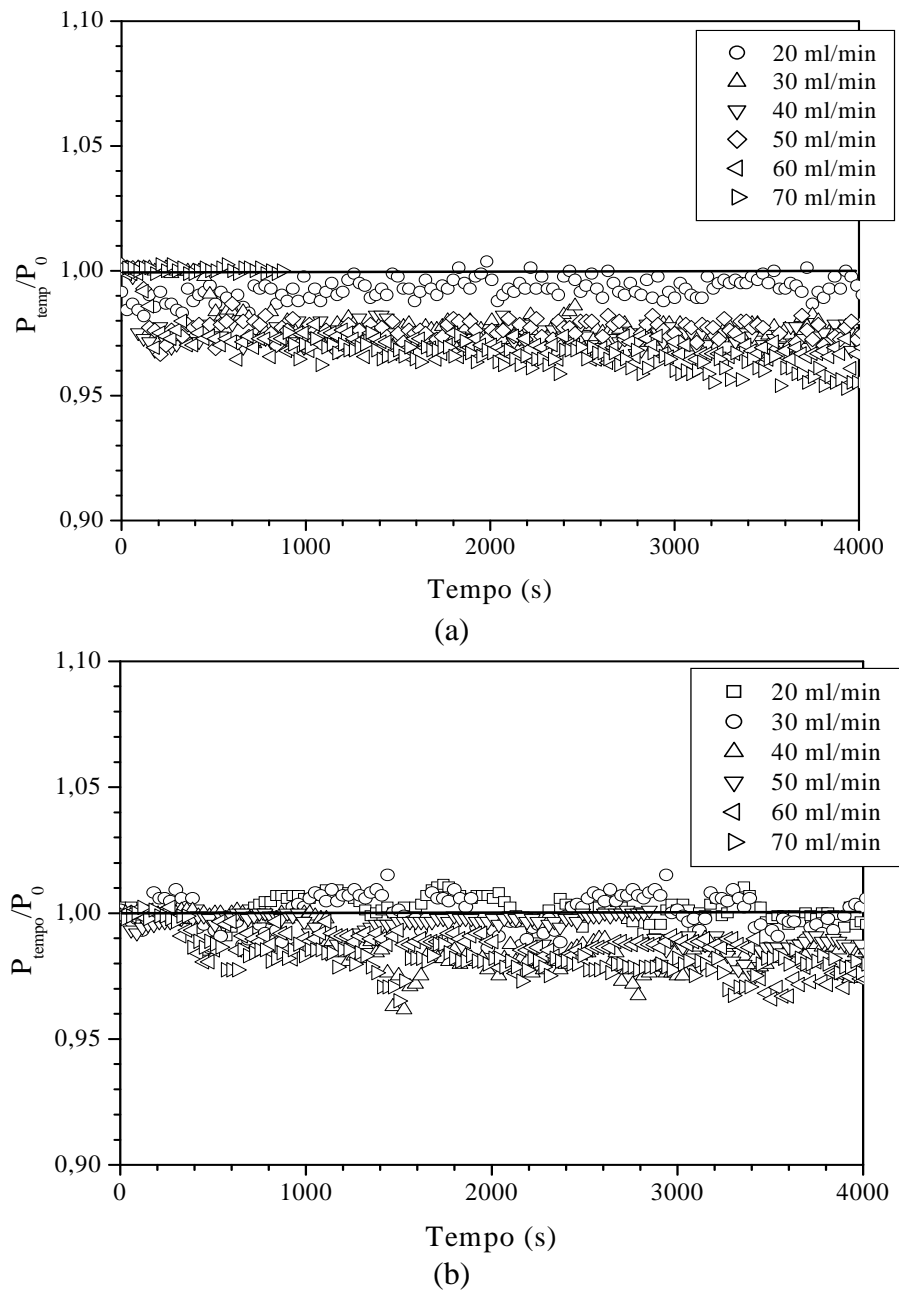


Figura 4.13: Adimensionais de pressão na entrada do equipamento em função do tempo parametrizada na vazão de alimentação para as temperaturas: a) 100°C e b) 120°.

Os adimensionais de pressão apresentaram-se praticamente constantes para ambas as temperaturas, 100 e 120°C e também para todas as vazões de alimentação. Através dos gráficos pode-se observar uma redução dos mesmos, porém esta não foi significativa, considerando que a maior redução não superou (4%) em relação à pressão inicial. Apesar dessa variação, o equipamento funcionou de maneira estável.

Os perfis de pressão estática foram analisados na presença da fase líquida. Observa-se na Figura 4.14 que os dados de pressão estática ao longo do tubo de transporte apresentaram comportamentos semelhantes para diferentes vazões de alimentação e velocidade do ar iguais, mostrando que a presença da fase líquida não influenciou significativamente os perfis apresentados.

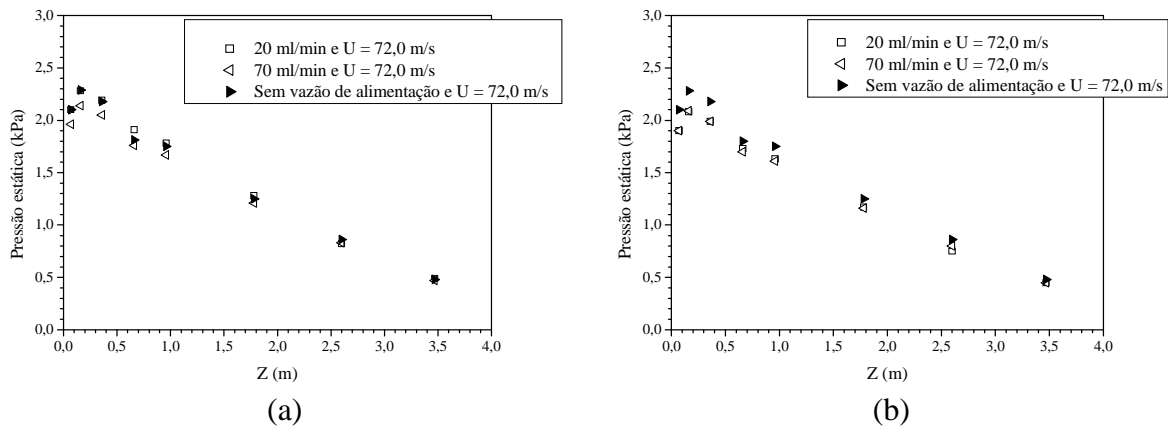


Figura 4.14: Pressão estática ao longo do tubo de transporte parametrizado nas vazões de alimentação à velocidade do ar de 72,0 m/s e temperatura do ar de entrada: a) 100°C e b) 120°C.

4.4.2. Análise dos dados de temperatura do ar

Foram obtidos para 100°C e diferentes vazões de alimentação os dados da temperatura do ar em função do tempo parametrizados na distância axial do tubo de transporte, conforme são apresentados na Figura 4.15.

Analisando o comportamento da temperatura do ar ao longo do tubo de transporte na presença da fase líquida, observa-se que a temperatura do ar diminui com o aumento do comprimento do tubo de transporte e com o aumento da vazão de alimentação. Este comportamento era esperado, considerando que existem perdas de calor.

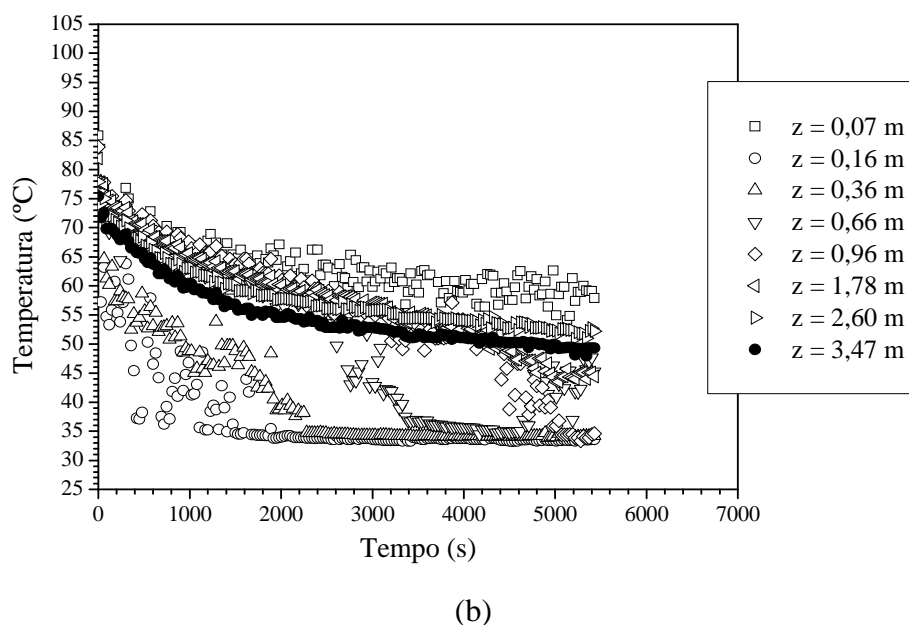
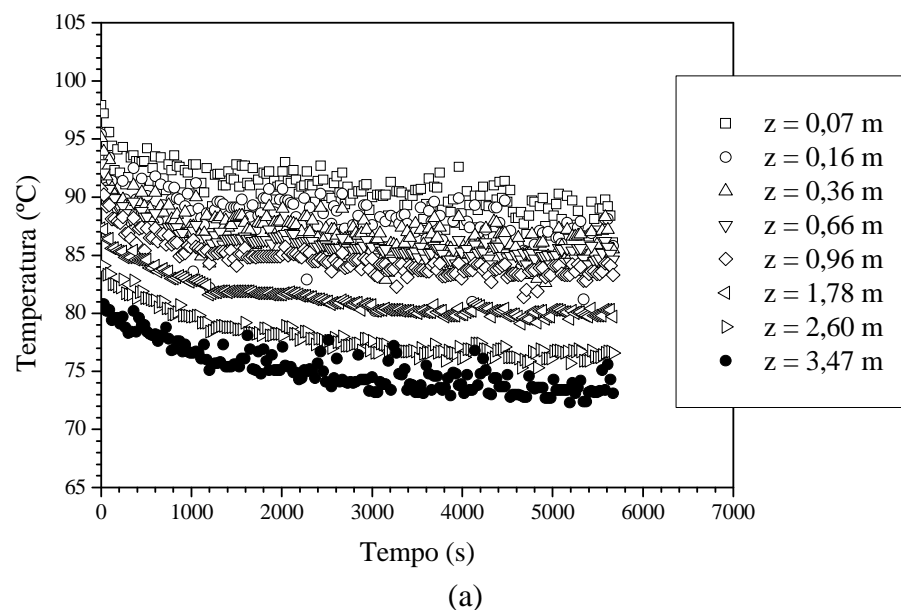
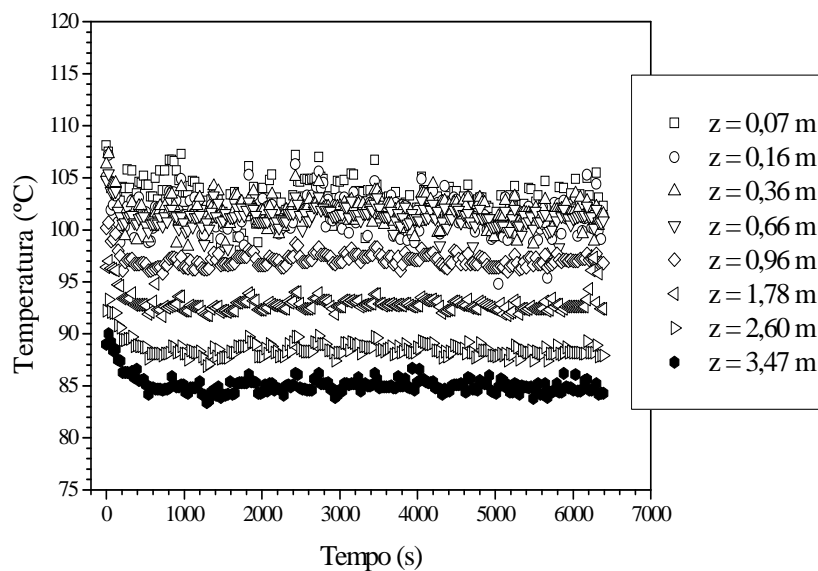


Figura 4.15: Temperatura do ar em função do tempo ao longo do tubo de transporte para temperatura do ar de entrada de 100°C e nas vazões de alimentação de: a) 20 ml/min e b) 70 ml/min.

Observa-se também que o transporte dos sólidos na presença da fase líquida influenciou significativamente nas medidas de temperatura do ar na entrada do tubo de transporte, principalmente para a maior vazão de alimentação. A Figura 4.15 (b) mostra que para essa vazão de alimentação, a redução na temperatura do ar ao longo do tubo de transporte foi maior, devido o aumento da quantidade de água para o sistema, resultando no comportamento apresentado. Esse comportamento é típico do processo de secagem.

A Figura 4.16 apresenta para 120°C e diferentes vazões de alimentação os dados da temperatura do ar em função do tempo parametrizados na distância axial do tubo de transporte. Através desses gráficos pode-se observar que para a temperatura do ar de entrada igual a 120°C e menor vazão de alimentação a temperatura do ar ao longo do tempo atinge o regime em menor tempo quando comparado com a temperatura do ar de entrada igual 100°C. Já para a maior vazão de alimentação ainda observa-se uma elevada redução de temperatura do ar ao longo do tubo de transporte na região de entrada do mesmo.



(a)

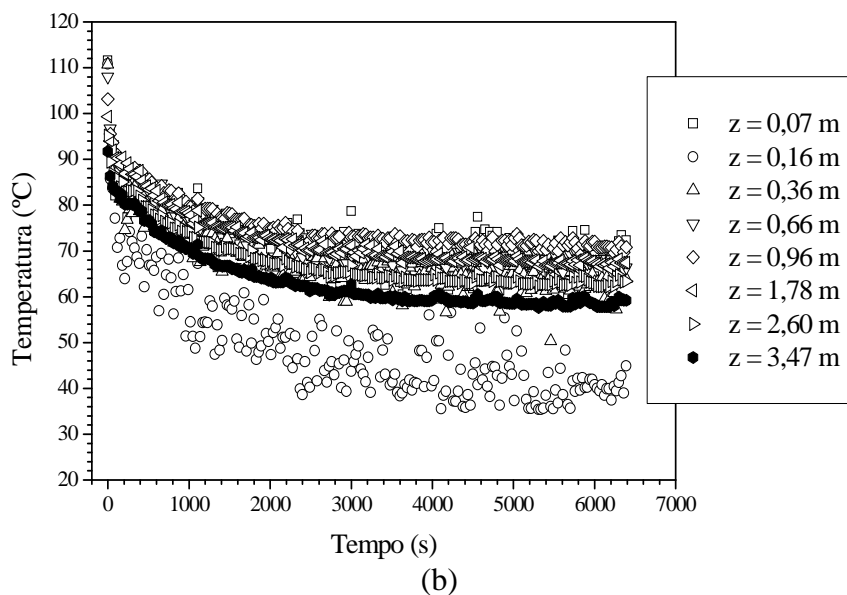


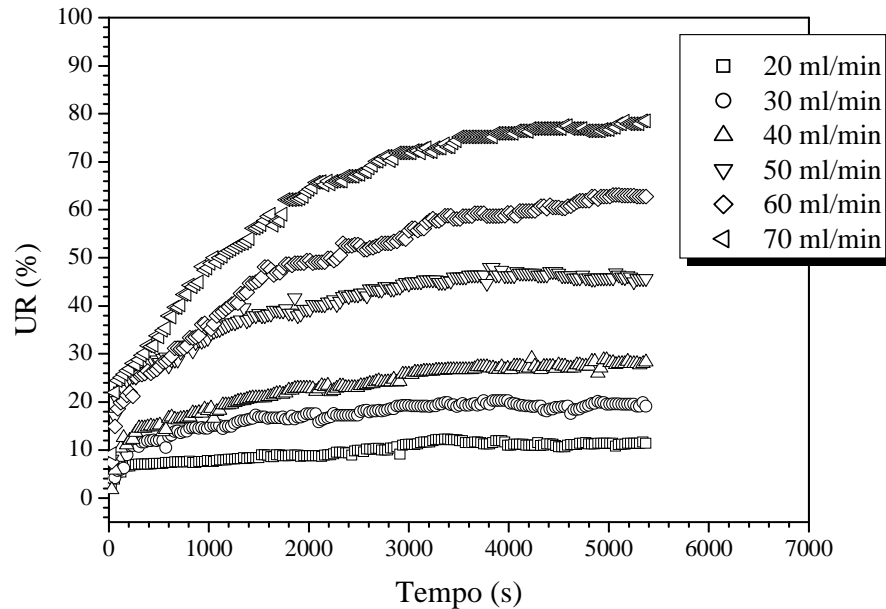
Figura 4.16: Temperatura do ar em função do tempo ao longo do tubo de transporte para temperatura do ar de entrada de 120°C e nas vazões de alimentação: a) 20 ml/min e b) 70 ml/min.

4.4.3. Umidade relativa do ar

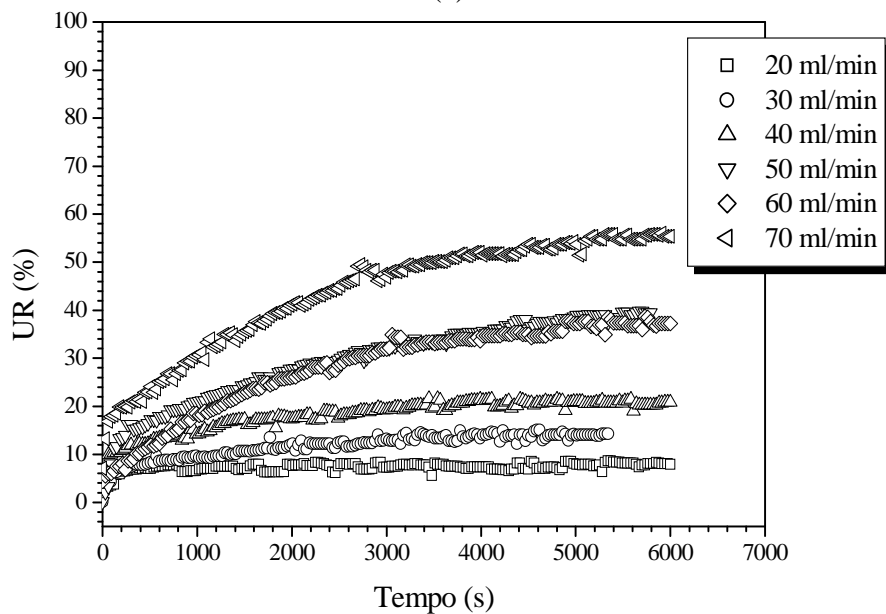
A evaporação da água foi analisada a partir de dados de umidade relativa do ar na saída do equipamento. Como a umidade relativa do ar pode ser influenciada pelas mudanças nas condições climáticas os dados de umidade relativa no tempo eram subtraídos da umidade relativa inicial ao longo do tempo para eliminar prováveis mudanças das condições ambientais.

A Figura 4.17 apresenta as curvas de umidade relativa em função do tempo parametrizado nas vazões de alimentação. A influência da temperatura do ar de entrada pode ser verificada através da Figura 4.17. Verifica-se que para vazões de alimentação semelhantes a umidade relativa foi menor para a temperatura de 120°C. Isso ocorreu devido ao aumento de energia térmica influenciar na pressão de equilíbrio do sistema gás-líquido, contribuindo para

que maiores vazões de alimentação possam ser utilizadas, isto é, aumenta o potencial evaporativo.



(a)



(b)

Figura 4.17: Umidade relativa do ar em função do tempo parametrizada na vazão de alimentação a temperatura a) 100°C e b) 120°C.

Para ambas as temperaturas, 100 e 120°C as curvas apresentaram comportamentos semelhantes para todas as condições operacionais. Esta figura, ainda mostra

o comportamento da umidade relativa do ar em função do tempo e da vazão de alimentação. Tanto no caso da vazão de alimentação como do tempo esse comportamento já era esperado, uma vez que a medida que aumentava a quantidade de água fornecida para o sistema maior era a quantidade de água evaporada.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões em relação aos dados obtidos e as discussões apresentadas nos resultados do comportamento fluidodinâmico e térmico. Também são apresentadas as conclusões com relação a simulação fluidodinâmica e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Análise Fluidodinâmica

O comportamento fluidodinâmico do equipamento foi, de fato, influenciado pelos diferentes z_0 utilizados (5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 cm). Os dados obtidos de vazão de sólidos em função da velocidade do ar, pressão estática ao longo do tubo de transporte e gradiente de pressão em função da velocidade do ar mostraram ser dependentes de z_0 .

A dependência da vazão de sólidos com o aumento da velocidade do ar tendem a ficar menor com o aumento de z_0 . Para z_0 iguais a 5,0 e 5,5 cm a vazão de sólidos aumentou com o aumento da velocidade do ar, sendo em torno de 45 % para toda a faixa de velocidade do ar utilizada, entre 50 e 75 m/s. Para z_0 igual a 6,0 cm o aumento foi menor, em torno de 21% para uma faixa de velocidade do ar menor, abaixo de 58, 0 m/s. Enquanto que para z igual a 6,5 cm a vazão de sólidos manteve-se praticamente constante para a velocidade do ar utilizada, uma vez considerada dentro dos erros experimentais.

A pressão estática ao longo do tubo de transporte aumentou com o aumento de z_0 , pois a pressão do sistema está relacionada com o aumento da quantidade de sólidos transportados. Além disso, foi verificado que o aumento de z_0 influenciou no comportamento de entrada do tubo de transporte, diminuindo o comprimento de entrada e reduzindo o efeito

apresentado na região do tubo de transporte, em z igual a 0,16 m, o qual passou a apresentar um perfil linear desde z igual a zero.

No que diz respeito aos gradientes de pressão em função da velocidade do ar, estes tornaram-se maiores com o aumento de z_0 , o que já era esperado devido ao aumento da pressão no sistema. Para cada z_0 utilizado foi possível identificar a região de regime denso e diluído, sendo que os mínimos obtidos para identificar estes regimes foram maiores com o aumento de z_0 . Para z_0 iguais a 5,0; 5,5 e 6,0 cm o comportamento qualitativo não se alterou com os apresentados por Marcus *et al.* (1990), em que a vazão de sólidos manteve-se constantes. Este comportamento é válido, pois como os gradientes de pressão foram obtidos no escoamento totalmente desenvolvido, o equilíbrio entre as forças peso e atrito deve ser atingido. Já para z_0 igual a 6,5 cm a análise realizada por Marcus *et al.* (1990) pode ser aplicada diretamente, uma vez que a vazão de sólidos manteve-se praticamente constantes para toda a faixa de velocidade do ar utilizada.

5.2. Simulação da Fluidodinâmica

Os resultados simulados de pressão apresentaram boa concordância com os dados experimentais, sendo capaz de descrever o perfil da pressão ao longo do tubo de transporte, principalmente para a maior vazão do ar.

Os resultados simulados de porosidade apresentaram boa concordância com os valores médios obtidos experimentalmente, sendo observadas as maiores aproximações aos dados experimentais para a maior vazão do ar.

Os resultados simulados de velocidades dos sólidos em função da vazão do ar apresentaram-se fisicamente consistentes.

5.3. Análise Térmica

Para as temperaturas do ar de entrada utilizadas, 80 e 100°C a influência observada nas curvas características do equipamento operando vazio e com sólidos não foi significativa.

O aumento da temperatura do ar de entrada, assim como, o aumento da velocidade do ar e da vazão de sólidos proporcionaram maior energia térmica ao sistema.

5.4. Evaporação da Água

Os resultados de pressão mostraram que para as condições operacionais utilizadas a presença da fase líquida não influenciou significativamente no comportamento fluidodinâmico do equipamento

Para o comportamento térmico a presença da fase líquida influenciou na temperatura do ar ao longo do tubo de transporte, a qual diminuiu com o aumento da vazão de alimentação. A presença da fase líquida influenciou também nas medidas de temperatura do ar na entrada do tubo de transporte.

A temperatura do ar influenciou no processo de evaporação da água. Isto foi verificado com o aumento da temperatura do ar de entrada, proporcionando menores valores de umidade relativa. Com isso mostrou-se que podem ser obtidos maiores potenciais evaporativos ao sistema.

5.5. Sugestões

Com base nos resultados obtidos no transportador pneumático com alimentador tipo jorro, sugere-se para trabalhos futuros:

- realizar um mapeamento da região acelerada através de métodos teóricos e experimentais, para que se possa quantificar o efeito do bocal redutor no comprimento dessa região;
- analisar a influência de z_0 no escoamento denso e diluído utilizando-se diferentes diâmetros de partículas no comportamento fluidodinâmico;
- analisar a secagem de pastas e suspensões e
- realizar a modelagem e simulação através da fluidodinâmica computacional (CFD).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKILLI, H.; LEVY, E.K.; SAHIN, B. Gas-solid flow behavior in a horizontal pipe after 90° vertical to horizontal elbow. **Powder Technology**, v. 116, p. 43-52, 2001.
- ÁLVARES, M. M. **Análise da medida de escoamento de sólidos em um transportador pneumático vertical**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 91 p., 1997.
- ARASTOPOUR, H.; GISDASPOW, D. Vertical pneumatic conveying using four hydrodynamic models. **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, v.18, p.123-130, 1979. In: FERREIRA, M.C. Desenvolvimento de leito pneumático com reciclo de sólidos e com alimentador tipo jorro. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 194 p., 1996
- BACELOS, M.P.; SPITZNER NETO, P.I.; SILVEIRA, A.M.; FREIRE, J.T. Analysis of fluid dynamics behavior of conical spouted bed in presence of pastes. **Drying Technology**, v.23, nº3, p. 427-453, 2005.
- BAEYENS, J.; GAUWBERGEN, D. V.; VINCKIER, I. Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in a design procedure. **Powder Technology**, v. 83, p.139-148, 1995.
- BARRETT, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed, In: MUJUMDAR, A.S., **Drying'89**. New York: ed. Hemisphere Publishing Corporation, p. 415-420, 1990.
- BI, H.T.; GRACE, J.R.; ZHU, J.X. (1993). In: BAI, D., ISSANGYA, A.S. e GRACE, J.R. A novel method for determination of choking velocities. **Powder Technology**, v. 97, p. 59-62, 1998.
- BIRD, R.B.; STEWART, E.; LIGHTFOOT, E. **Fenômenos de Transporte**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004, 838 p.
- BLASIUS, H. **Forschungsarbeiten auf dem gebiete des ingenieurwesens**, 131, 1913 In: NARIMATSU, C. P. Contribuições ao estudo da secagem em um leito vertical. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 261 p., 2004.
- BUNYAWANICHAKUL. G.J. Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a simple pneumatic dryer. **Engineering Biosystems**, v. 96, p. 335-344, 2007.
- CAPES, C. E NAKAMURA, K. Vertical pneumatic conveying: an experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 51, p. 31-38, 1973.

- CASAVECHIA.L.C. **Estudo da fluidodinâmica e da troca térmica gás-sólido no transporte pneumático vertical ascendente de misturas de partículas sólidas.** PPG-DETF, UNICAMP, Campinas, SP, Dissertação de Mestrado, 341 p., 1993.
- CHONG, Y.O.; LEUNG.L.S. Comparison of choking velocity correlations in vertical pneumatic conveying. **Powder Technology.** v. 47, p. 43-50, 1986.
- COSTA, I. A. **Contribuições ao estudo do escoamento sólido-fluido nos regimes denso e diluído em um leito de transporte pneumático vertical.** PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 168 p., 2001.
- COSTA, I.A.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, J.T. Analysis of regime transitions and flow instabilities in vertical conveying of coarse particles using different solids feeding systems. **The Canadian Journal Engineering**, 82, p. 48-59, 2004.
- DAS, M.; BANDYOPADHYAY, A.; MEIKAP, B.C.; SAHA, R.K. Axial voidage profiles and identification of flow regimes in the risers of a circulating fluidized bed. **Chemical Engineering Journal.** v. 145, p. 249-258, 2008
- ENICK, R.; KLINZING, G.E. 1985 In: MARCUS, R.D.; LEUNG, L.S.; KLINZING, G.E e RIZK, F. **Pneumatic Conveying of Solids.** 1.ed. Great Britain, Edmondsbury Pres. 596 p. 1990
- ERGUN, S., Fluid flow through packed columns. **Chem. Proc. Des. Dev.**, v. 48, p 89-94, 1952.
- FELTRAN, M.B. **Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro.** PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 68 p., 2005
- FERREIRA, M.C. **Desenvolvimento de leito pneumático com alimentador tipo jorro.** PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 194 p., 1996.
- FERREIRA, M.C. **Desenvolvimento de Leito Pneumático com Reciclo de Sólidos e com Alimentador Tipo Jorro.** PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 169 p., 1991
- FERREIRA, M.C.; FREIRE, J.T. Fluid dynamics characterization of a pneumatic bed with a spouted bed type solid feeding system. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70, nº 10, p. 905-909, 1992.
- FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M.; FERREIRA, M. C. **Transporte pneumático vertical.** São Carlos: Departamento de Engenharia Química, 1993. 89 p. Apostila.

- GARIC, R.; GRBAVIC, Z.; VUKOVIC, D.V.; HADZISMAJLOVIC, DZ. E.; LITTMAN, H.; MORGAN, M.H. E JOVANOVIC, S. DJ. Hydrodynamic modelling of vertical non-accelerating gas-solids flow. **Powder Technology**, v. 84, nº 1, p. 65-74, 1995.
- GIDASPOW, D. **Hyperbolic compressible two-phase flow equations based on stationary principles and the fick's law**. In: COSTA, I. A. contribuições ao estudo do escoamento sólido-fluido nos regimes denso e diluído em um leito de transporte pneumático vertical. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 168 p., 2001.
- GRBAVIC, Z.B.; GARIC, R.V.; JOVANOVIC, S.Dj.; ROZIC.Lj. S. hydrodynamic modeling of vertical accelerating gás-solid flow. **Powder Technology**, v 92. p. 155-161, 1997.
- GRBAVIC, Z.B.; GARIC, R.V.;VUKOVIC, D. V.; HADZISMAJLOVIC, Dz.E.; LITTMAN, H.; MORGAN, M.H. & JOVANOVIC, S.Dj. Hydrodynamic modelling of vertical liquids-solids flow. **Powder Technology**, v. 72, p. 183-191, 1992.
- GRBAVIC, Z.B.; VUKOVIC, D.V.; HADZISMAJLOVIC, DZ. E.; JOVANOVIC, S. DJ.; LITTMAN, H.; MORGAN. A variational model for prediction fluid-particle interphase drag coefficient and particulate expansion of fluidized and sedimenting beds. **Powder Technology**, v. 68, p. 199-211, 1991.
- GRBAVIC, Z.B.; ZORANA, Lj.; GARIC, R. Drying of suspension and pastes in fluidized bed of inert particles. **J. Serb. Chem. Soc.** v. 65, p. 963-974, 2000.
- KALMAN, H. Attrition of powders and granules at various bends during pneumatic conveying, **Powder Technology**, v. 112, p. 244-250, 2000.
- KAVASSAKI, Y. Desenvolvimento da técnica de medida de baixas pressões diferenciais aplicadas a determinação de perda de carga localizada em conexões com redução. EESC/USP, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 118 p., 1989
- KHAN. J.L. e PEI, D.C. **Ind. Eng. Chem.**, Proc. Des. Dev. Vol .12, nº 4, 1973. In: Tópicos Especiais em Sistemas Particulados, Gráfica da UFSCar, São Carlos, SP, p. 263-265, cap.7.
- KIM, S.W.; KIRBAS, G.; BI, H., LIM, C.J.; GRACE, J. R. Flow behavior and regime transition in a high-density circulating fluidized. **Chemical Engineering Science**, v 59, p. 3955-3963, 2004.
- KLINZING, G.E.; ROMATGH, N.D.; ZALTASH, A. MYLER, C.A. Pneumatic transport – a review (Generalized phase diagram approach to pneumatic transport) **Powder Technology**, v. 51, p. 135-149, 1987.

- KONAKOV, V.K. **Dok Akad. Nauk. SSSr**, 25,5, 14 p. 1950. In: NARIMATSU, C. P. Contribuições ao estudo da secagem em um leito vertical. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 261 p., 2004.
- KONNO, H.; SAITO, S.J. **Chem. Eng. Japan**. 2,211, 1969. In: NARIMATSU, C. P. Contribuições ao estudo da secagem em um leito vertical. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 261 p., 2004.
- KONRAD, K. Dense-phase pneumatic conveying: a review. **Powder Technology**. v 49, p. 1-35, 1986.
- LEUNG, L.S.; WILES, R.J. A quantitative design procedure for vertical pneumatic conveying systems. **Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev.** v.15, p. 552-557, nº 4, 1976.
- LIM, E.W.C.; ZHANG, Y.; WANG, C. Effects of an electrostatic field in pneumatic conveying of granular materials through inclined and vertical pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p. 7889 – 7908, 2006.
- LITTMAN, H; MORGAN, M.H.; PACCIONE, J.D.; JOVANOVIĆ, S.DJ; GRBAVIĆ, Z.B. Modelling and measurement of the effective drag coefficient in decelerating and non-accelerating turbulent gas-solids dilute phase flow of large particles in a vertical transport pipe. **Powder Technology**, v.77, p. 267-283, 1993.
- LITTMAN, H; MORGAN, M.H.; VUKOVIĆ, D.V; ZDANSKI, F.K.; GRBAVIĆ, Z.B. Prediction of the maximum spoutable height and the average spout to inlet tube diameter ratio in spouted beds of spherical particles. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.57, p. 684-687, 1979.
- LOPES, C.S. **Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Dissertação de Mestrado, 95 p., 2007.
- MARCUS, R.D.; LEUNG, L.S.; KLINZING, G.E. E RIZK, F. Pneumatic conveying of solids: **A Theoretical and Practical Approach**. 1 ed. St Edmundsbury Press: Great Britain, 1990, 575 p.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2. ed. RJ: E-Papers serviços editoriais, 2002. 152 p.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. **Spouted Bed**, 1. ed. New York: Academic Press Inc.LTD., 1974, 304 p.

- McADAMS, **loc.cit.** 155 p, 1962. In: NARIMATSU, C. P. Contribuições ao estudo da secagem em um leito vertical. . PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de doutorado, 261 p., 2004.
- NARIMATSU, C. P. **Contribuições ao estudo da secagem em um leito vertical.** PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 261 p., 2004.
- NEBRA, S.A. **Secagem pneumática de bagaço de cana.** FEM, UNICAMP, Campinas, SP, Tese de Doutorado, 121 p., 1985.
- PATEL, K.; BRIDGWATER, J.; BAKER, C.G.J.; SCHNEIDER, T. Spouting behaviour of wet solids. In: MUJUMDAR, A.S., **Drying'86.** New York: Hemisphere Publishing Corporation, p. 183-189, 1986.
- PÉCORA, A. A. B. **Estudo experimental do escoamento gás-sólido em fase diluída com transferência de calor e de massa.** FEA, UNICAMP, Campinas, SP, Dissertação de Mestrado, 151 p., 1985.
- PELEGRINA, A.H. Modelling the pneumatic drying of food particles. **Journal of Food Engineering**, v. 48. p. 301-310, 2001.
- PHAM, Q.T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood, **The Canadian Journal of Chemical Engineering** , v. 61, p. 426-434, 1983.
- 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, 2008.
- RAUTIAINEN. A. An experimental study of vertical pneumatic conveying. **Powder Technology**. v. 104, p. 139-150, 1999.
- ROCHA, S. C. S. **Contribuição ao estudo da secagem pneumática vertical: simulação e influência do coeficiente de transferência de calor gás-partícula.** Escola Politécnica, USP, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 258 p., 1988.
- ROSE, N.E.; DUCKWORTH, R.A. Transport of solids particles in liquid and gases. **The Engineer**. p. 392-396 e 430 - 483, 1969
- SCHALLERT, R.; LEVY, E. Effect of a combination of two elbows on a particle roping in pneumatic conveying. **Powder Technology**, v. 107, p. 226-233, 2000.

- SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying of solutions and suspensions in spouted bed, In: MUJUMDAR, A.S., **Drying'89**, New York: ed. Hemisphere Publishing Corporation, p. 421-425, 1990.
- SILVA, E. M. V., **Desenvolvimento e análise fluidodinâmica de um sistema de transporte pneumático vertical com alimentador tipo jorro e parafuso sem fim**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 144 p., 1997
- SILVA, M.G.C., **Dinâmica do transporte pneumático de partículas**. PPG-EQ/UNICAMP, Campinas, SP, Dissertação de Mestrado, 153 p., 1984.
- SPITZNER NETO, P.I. **Estudo da secagem de pastas e da fluidodinâmica do leito de jorro na presença de pastas e líquidos**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de Doutorado, 284 p., 2001.
- STEMERDING, S. The pneumatic transport of cracking catalyst in vertical riser. **Chemical Engineering Science**, v.17, p. 599-608, 1962.
- WOODS. J.A. Horizontal pneumatic conveying from a fluidized bed. **Chemical Engineering Science**. v. 63, p 1741-1760, 2008.
- YANG, W.C. Correlation for solid friction factor in vertical pneumatic conveying lines. **AIChE Journal**, v. 24, p. 548-552, 1977.
- YERUSHALMI, J.; CANCKURT, N. Further studies of regimes of fluidization. **Powder Technology**. v. 24, p. 187-205, 1976. In: SILVA, E. M. V., **Desenvolvimento e análise fluidodinâmica de um sistema de transporte pneumático vertical com alimentador tipo jorro e parafuso sem fim**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Tese de doutorado, 144 p., 1997
- YOUSFI, Y.; GAU, G. Aerodynamique de l'écoulement vertical de suspensions concentrées gás-solides – I. regimes d'écoulement et stabilité aerodynamique. **Chemical Engineering Science**, v. 29, p. 1939-1946, 1974.
- ZENS, F.A. Two-phase fluid-solid flow. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v 41, p. 2801-2806, 1949.
- ZORANA, Lj. A.; GRBAVIC, Z.B.; GARIC, R.V. Drying of suspensions in the draft tube spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 82, p. 450-464, 2004.

ANEXO A

**FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS PARA A ANÁLISE
FLUIDODINÂMICA E EVAPORAÇÃO DA ÁGUA.**

