

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

**INFLUÊNCIA DO ALIMENTADOR DE
SÓLIDOS NA FLUIDODINÂMICA DO
TRANSPORTE PNEUMÁTICO**

Cibele Souza Lopes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial 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

2007

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

L864ia

Lopes, Cibele Souza.

Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático / Cibele Souza Lopes. -- São Carlos : UFSCar, 2007.

80 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Engenharia química – fenômenos de transporte. 2. Loop pneumático. 3. Inserção de partículas. 4. Comportamento fluidodinâmico. 5. Flutuação de pressão. I. Título.

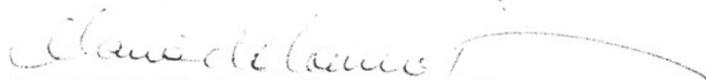
CDD: 660.2842 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **CIBELE SOUZA LOPES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 13 DE MARÇO DE 2007.

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof.ª Dr.ª Maria do Carmo Ferreira
PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. José Romário Lima Verde
FEQ/UFU

“Quando nada parece surtir efeito em minha profissão, eu vou ver o homem que trabalha as pedras e o observo marretando a rocha cerca de uma centena de vezes antes que ela dê o menor sinal de rachar. Mas a centésima primeira marretada a divide em duas, e eu fico sabendo que isso não é obra desta última marretada e sim, de todas as outras que vieram antes.”

César Romão

AGRADECIMENTOS

Obrigada Senhor, primeiramente pela vida e por estar sempre ao meu lado, especialmente ao longo deste trabalho, dando-me inteligência e boa vontade pra continuar sempre essa busca por aperfeiçoamento. Obrigada por colocar pessoas tão especiais nessa trajetória, que foram decisivas e imprescindíveis para que eu conquistasse mais essa vitória.

Obrigada pelo Freire e Maria do Carmo que sempre me ofereceram orientação e ensinamentos com dedicação, paciência e ternura.

Obrigada pela Ana, Dermeval e Ronaldo que deram diferentes contribuições, cada um à sua maneira, mas que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. E também pelo Oscar, e toda sua paciência e prontidão nos inúmeros consertos e favores que precisei, além da companhia e amizade.

Obrigada por todos os amigos do Centro de Secagem e demais amigos que fiz em São Carlos, que com suas amizades foram importantes para que a solidão não me afrontasse, o que poderia me fazer desistir.

Agradeço pelo Anderson, meu cunhado e grande amigo e que sempre me ajuda com muita dedicação e atenção.

Agradeço-o pelo Robson, muito além de companheiro e amigo, um amor que só Tu podes explicar e compreender a importância e dimensão no meu viver.

Agradeço também pela minha Mãe, meu Daddy e minhas irmãs, Cíntia e Cinara, que são continuações da minha alma, e totalmente responsáveis por um sentimento que eu sinto em cada dia do meu viver sempre me fazendo prosseguir, que aqui, só posso denominá-lo AMOR.

RESUMO

O transporte pneumático consiste em uma operação na qual materiais pulverulentos ou granulares são transportados através de uma tubulação, suspensos em uma corrente de gás. É comumente encontrado em diversos segmentos industriais, sendo utilizados como transportadores, por exemplo, na produção de grãos; como secadores, na secagem de cereais e bagaço de cana para queima; ou como reatores, em reações de craqueamento catalítico, operações de combustão e calcinação.

Dentre as partes que compõem um leito pneumático, a alimentação é uma das áreas mais cruciais e importantes, uma vez que a fluidodinâmica do leito sofre alteração devido à brusca mudança de quantidade de movimento que ocorre neste ponto provocada pela inserção da fase particulada.

O objetivo principal deste estudo foi realizar uma análise fluidodinâmica num *loop* pneumático com três diferentes configurações de alimentadores (alimentador gravitacional; alimentador gravitacional combinado com bocal redutor e alimentador gravitacional combinado com Venturi), identificando cada aspecto importante em relação à configuração de alimentação e seu efeito no sistema como um todo. A influência do diâmetro de partícula (dp) na fluidodinâmica do leito, operando com os alimentadores citados, foi analisada. Finalmente, uma avaliação da influência do diâmetro de ‘garganta’ do alimentador Venturi foi realizada.

Pelos resultados obtidos é possível confirmar que, de fato, a fluidodinâmica de um transportador pneumático é relacionada com o sistema de alimentação, e que a configuração, formato e tamanho destes, ditam as condições

operacionais possíveis para tal sistema. Outro fator que também influi na delimitação destes limites é *dp*.

Finalmente, nota-se que na literatura, muitos dos trabalhos referentes a transportadores pneumáticos não consideram a alimentação nas suas análises e muitos deles nem mesmo descrevem o tipo de alimentação utilizada. Porém, os resultados do presente trabalho evidenciam que atenção especial deve ser dispensada ao sistema de alimentação, pois este pode gerar elevada perda de carga, onerando o sistema ou mesmo inviabilizando-o.

ABSTRACT

Pneumatic transport is an operation where powdery and granular materials are conveyed through a pipeline suspended in a gas flow. It is usually found in several industries segments and it is used as a carrier, such as, in beans production; drying operation, like grain dryers; or as reactors, in cracking catalytic reactions, combustion operations and precalciner.

One of most important parts in a pneumatic conveying is the feeding system since in this area takes place an abrupt change of momentum due the introduction of solids and this influences the fluid dynamic of the system.

The purpose of this work was to carry out a study of influence of three feeders (gravity feeder, gravity feed concerted with a reduction of area and gravity feed concerted with a venturi) in the fluid dynamic of the system, identifying the main aspects of the feeders and their effects in the global system. The influence of dp and the “throat” diameter in the venturi feeder was evaluate.

Experimental data showed that the fluid dynamic and feeding device was linked, and the shape and size of the feeder and the particle size dictated the possible operation conditions for the transport.

Finally, was observed that in the literature, many authors don't consider the feeding system in their studies about pneumatic conveying. However, the results showed that special attention should be given to the feeders, since it can generate high pressure losses which increase the systems costs or even make it impracticable.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
NOMENCLATURA.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – Transporte Pneumático.....	3
2.1.1 – Modos de Transporte.....	5
2.1.2 – Constituição de um Transportador Pneumático.....	13
2.2 – Alimentação no Transporte Pneumático.....	16
2.2.1 – Alimentador Gravitacional.....	22
2.2.2 – Bocal Redutor.....	25
2.2.3 – Alimentador Venturi.....	28
2.3 – Pressão no transporte pneumático.....	30
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 – Materiais.....	33
3.2 – Equipamento.....	34
3.3 – Técnicas de medidas.....	37

3.3.1 – Vazão volumétrica de ar.....	37
3.3.2 – Vazão mássica de sólidos.....	39
3.3.3 – Pressão estática.....	40
3.4 – Procedimento experimental.....	43
3.4.1 – Obtenção dos dados experimentais.....	43
3.4.2 – Reprodutibilidade das medidas experimentais	45
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 – Leito operando sem partículas.....	47
4.2 – Influência da presença das partículas.....	57
4.3 – Influência do diâmetro de partícula.....	65
4.4 – Análise do venturi.....	69
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de queda de pressão no leito em função da velocidade do gás (Marcus <i>et al.</i> , 1990).....	9
Figura 2.2	O sistema de transporte pneumático (Marcus <i>et al.</i> , 1990).....	14
Figura 2.3	Comportamento característico da pressão estática em função da altura do tubo de transporte, para o escoamento em fase diluída (Silva, 1997).....	18
Figura 2.4	Alimentador gravitacional.....	23
Figura 2.5	Bocal redutor.....	26
Figura 2.6	Alimentador Venturi (Marcus <i>et al.</i> , 1990; Jitschin, 2004).....	28
Figura 2.7	Perfil de pressão ao longo de um venturi (Jitschin, 2004).....	29
Figura 3.1	Linha de transporte pneumático.....	35
Figura 3.2	Configurações de alimentação. (a)Sem restrição; (b)bocal redutor; (c)Venturi 33mm, (d)Venturi 43mm. Desenhos fora de escala, com dimensões em mm.....	36
Figura 3.3	Caixa de amostragem de sólidos.....	40
Figura 3.4	Temperatura em função do tempo para os alimentadores gravitacional e gravitacional combinado com venturi 43 mm.....	44
Figura 4.1	$\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para as três configurações de alimentação.....	48
Figura 4.2	Perda de carga parcial e total em função da vazão volumétrica de ar. (a) Alimentador gravitacional sem restrição; (b) alimentador gravitacional com bocal redutor; (c) alimentador gravitacional com Venturi.....	50
Figura 4.3	Pressão estática média ao longo do leito para $Q_f = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ nas três configurações de alimentação.....	52

Figura 4.4	Pressão estática média ao longo do leito. (a) Alimentador gravitacional sem restrição; (b) alimentador gravitacional com bocal redutor; (c) alimentador gravitacional com Venturi.....	53
Figura 4.5	Pressão ao longo do leito para as configurações estudadas na condição de Q_f máximo. (a) Alimentação; (b) trecho ascendente; (c) curva 180° e trecho descendente.....	54
Figura 4.6	$\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para $d_p = 0,85$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	59
Figura 4.7	Desvio padrão ao longo do leito para diferentes condições operacionais e $d_p = 0,85$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	61
Figura 4.8	Pressão média ao longo da região de aceleração do leito para $Q_f = 0,03$ m ³ /s; $W_s = 0$ e 0,03 kg/s, para as configurações de alimentação bocal redutor e Venturi.....	63
Figura 4.9	Pressão média ao longo do leito para $Q_f = 0,03$ m ³ /s e $d_p = 0,85$ mm para diferentes valores de W_s . (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	64
Figura 4.10	$\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para $d_p = 0,85$ mm e 2,0 mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	66
Figura 4.11	Desvio padrão ao longo do leito para diferentes condições operacionais e $d_p = 2,0$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	67
Figura 4.12	Pressão média ao longo do leito para $Q_f = 0,04$ m ³ /s e $W_s = 0,03$ kg/s. (a) Alimentador gravitacional combinado com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.....	68
Figura 4.13	$\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para o alimentador gravitacional combinado com Venturi. (a) 0,85 mm; (b) 2,0 mm.....	71
Figura 4.14	Pressão média ao longo do alimentador Venturi. (a) 0,85 mm; (b) 2,0 mm.....	72

Figura 4.15	Pressão média ao longo do leito quando operado com o alimentador Venturi para $Q_f = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $W_s = 0,03 \text{ kg/s}$. (a) 0,85 mm; (b) 2,0 mm.....	73
-------------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Velocidades do ar necessárias para transportar sólidos de várias densidades (adaptado de Perry, 1999).....	4
Tabela 2.2	Eficiência de diversos equipamentos de separação gás-sólido para vários tamanhos de partículas (Marcus <i>et al.</i> , 1990).....	16
Tabela 3.1	Localização das tomadas de pressão, anéis piezométricos e transdutores de pressão em relação à variável ζ	42
Tabela 4.1	Valores máximos de vazão de ar dos intervalos operacionais para cada configuração de alimentação quando o leito opera sem partículas.....	47

NOMENCLATURA

c – constante presente na Equação da 3.2

$C_{D\varepsilon}$ – força de arraste de uma partícula presente num leito [N]

$C_{D\infty}$ – força de arraste de uma partícula isolada [N]

d_p – diâmetro de partícula [mm]

D_G – diâmetro de garganta [mm]

D_t – diâmetro da tubulação [mm]

F_r – número de Froude [adimensional]

g – aceleração da gravidade [m/s^2]

L – comprimento total do leito [m]

P – pressão estática [kPa]

P_{atm} – pressão atmosférica [=1034 cm col. H_2O]

Q_f – vazão volumétrica de ar [m^3/s]

T – temperatura do leito [K]

W_f – vazão mássica de gás [kg/s]

W_s – vazão mássica de sólidos [kg/s]

Z_o – distância entre a entrada de ar e a extremidade inferior do tubo de transporte num alimentador tipo jorro [mm]

Símbolos Gregos

β' – constante presente na Equação 3.3

δ – expoente presente na Equação 2.1

Δh – diferença de altura entre as colunas de água do manômetro tubo em U

[cm col. H₂O]

ΔP – queda de pressão total do leito [kPa]

Δz – unidade de comprimento do tubo [m]

ε – porosidade

ε_c – porosidade de ‘*choking*’

ε_{mf} – porosidade de mínima fluidização

ζ – comprimento linear do leito [m]

κ – permeabilidade do leito poroso [m²]

λ_z – fator de atrito partícula-parede

μ – viscosidade do ar [kg/m.s]

v_b – velocidade de ‘*slug*’ [m/s]

v_c – velocidade de ‘*choking*’ [m/s]

v_f – velocidade do ar [m/s]

v_{mf} – velocidade de mínima fluidização [m/s]

v_t – velocidade terminal da partícula [m/s]

ρ_f – densidade do ar [kg/m³]

χ – expoente presente na Equação 2.1

Ψ – razão entre as vazões mássicas de sólido e gás [$\Psi = W_s/W_f$]

Abreviações:

máx. – máximo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O transporte pneumático é uma das mais importantes técnicas de transporte de partículas na indústria, que realiza a movimentação do material suspenso numa corrente de gás, a distâncias horizontais ou verticais (Perry, 1999). É utilizado em diversos segmentos industriais para o transporte de inúmeros materiais e por apresentar um excelente contato gás-partícula e baixos tempos de residência, é ainda empregado como secador e reator (leitos fluidizados circulantes). Exemplos de transportadores pneumáticos podem ser facilmente encontrados nas indústrias de grãos, na secagem de cereais e como reatores de craqueamento catalítico e em operações de combustão e calcinação.

Dentre as partes constituintes de um leito pneumático, a alimentação merece uma atenção especial, uma vez que está relacionada com a estabilidade operacional, além de interferir na viabilidade técnica, econômica e na eficiência do sistema.

A literatura apresenta diversas propostas de sistemas de alimentação com diferentes princípios de funcionamento. Dentre estas, nesse trabalho será analisado mais apuradamente o alimentador do tipo gravitacional. Este alimentador utiliza a força da gravidade para inserir sólidos na corrente gasosa num leito, trazendo economias aos custos operacionais do processo. Ainda nesta linha, configurações modificadas deste alimentador serão consideradas.

Uma dessas alterações trata da inserção de um dispositivo denominado bocal redutor na região anterior à inserção de sólidos, que reduz a área de escoamento do gás e já foi utilizado por outros autores em seus estudos (Silva, 1997; Osti, 2003; Bovo e Ferreira, 2004). A outra modificação é realizar a descarga de sólidos na região de depressão de um dispositivo Venturi, um dispositivo de alimentação muito usado em sistemas industriais de transporte pneumático (Marcus *et al.*, 1990).

Diante da influência do alimentador no funcionamento de um leito pneumático, especialmente na perda de carga e na estabilidade do sistema, o objetivo desse trabalho é colaborar neste aspecto, através da obtenção e análise de dados experimentais em um *'loop'* pneumático operando com três diferentes configurações de alimentação de sólidos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Transporte Pneumático

O transporte pneumático consiste em uma operação na qual materiais pulverulentos ou granulares são transportados através de uma tubulação, suspensos em uma corrente de gás. Na maioria dos casos, este gás é o ar; no entanto, outros gases são usados quando se têm condições especiais previstas, como riscos de explosão, saúde e perigo de incêndio (Marcus *et al.*,1990).

Este é um importante processo utilizado em diversos segmentos industriais e tem sido usado comercialmente há muitos anos, pois apresenta, entre outras vantagens, baixos custos de manutenção, flexibilidade em relação à configuração e facilidade de automação e controle. As limitações implicadas neste tipo de sistema são quase sempre mais de ordem econômica do que técnica, como por exemplo, o alto custo energético e a distância de transporte. Porém, devido ao desenvolvimento tecnológico focando a questão energética e o transporte econômico, muitas barreiras estão sendo ultrapassadas, ampliando enormemente a utilização industrial de transportadores pneumáticos (Marcus *et al.*,1990).

Teoricamente, todos os pós e materiais granulares podem ser transportados pneumaticamente. No entanto, quanto maior e mais denso o material, maior será a velocidade do gás requerida para uma operação eficiente e, conseqüentemente, maior o consumo de energia. A Tabela 2.1 apresenta velocidades de ar necessárias

para o transporte de materiais de diversas densidades. Uma lista de produtos transportados de forma satisfatória em leitos pneumáticos pode ser encontrada em Marcus *et al.* (1990), que inclui desde sólidos em pó e galinhas vivas até peças de material manufaturado. Os requisitos ideais para que um material seja transportado pneumaticamente são: escoamento livre, abrasividade nula e caráter não fibroso. Contudo, com o desenvolvimento de novos tipos de transportadores operando com gás a baixa velocidade, cresce a utilização deste sistema para materiais corrosivos, abrasivos e friáveis (Marcus *et al.*,1990).

Tabela 2.1 – Velocidades do ar necessárias para transportar sólidos de várias densidades (Adaptado de Perry,1999).

Densidade (kg/m³)	Velocidade do ar (m/s)	Densidade (kg/m³)	Velocidade do ar (m/s)
160	14,73	1120	39,12
204	18,23	1200	40,63
320	20,93	1280	41,92
400	23,37	1360	43,18
480	25,65	1440	44,20
560	27,93	1520	45,72
640	29,67	1600	46,73
720	31,37	1680	48,00
800	33,02	1760	49,28
880	34,53	1840	51,97
960	36,32	1920	53,33
1040	37,83		

Os sistemas de transporte pneumático, por apresentarem um excelente contato gás-partícula e baixos tempos de residência, podem ainda ser utilizados como secadores (Pécora, 1985), onde o mecanismo de transferência de calor relevante é o convectivo (Baeyens *et al.*,1995) ou como reatores, os denominados leitos fluidizados circulantes (Reh, 1986), que consistem basicamente em um leito

onde as partículas são fluidizadas e transportadas por uma corrente de gás até ciclones sendo então, separadas e recicladas (Silva, 1997). Alguns exemplos de aplicações estão na secagem de cereais, bagaços de cana para queima em caldeiras (Nebra, 1985), e pós, utilizados em indústrias alimentícias (Pécora, 1985; Hufenuessler e Brunello, 1986; Ferreira, 1991). Como reatores eles são encontrados em operações de craqueamento catalítico, combustão, produção de propileno (Zhang e Zhu, 2000) e como pré-calcinadores em indústrias cimenteiras (Huilin *et al.*, 2004).

Assim, devido à sua grande versatilidade, sistemas de transporte pneumático são muito utilizados no meio industrial, quer como transportadores, reatores ou secadores, o que torna bastante evidente a importância de seu estudo, visando o completo entendimento e aperfeiçoamento desse sistema.

2.1.1 - Modos de Transporte

Existem diversas formas de classificação do escoamento para um sistema gás-sólido. Porém, uma das formas mais utilizadas é basear-se na concentração média de partículas presentes na tubulação. Assim, têm-se dois tipos básicos de sistemas: em fase diluída ou em fase densa (Marcus *et al.*, 1990).

Os sistemas em fase diluída empregam, com frequência, grandes volumes de gás a altas velocidades. A corrente de gás carrega o material como partículas discretas, fazendo com que as forças de empuxo e de arraste atuem de forma individual em cada partícula. Segundo Leung (1980), a fase diluída apresenta as seguintes características: suspensão de concentração uniforme, com porosidade

maior que 0,97; ausência de recirculação de sólidos e queda de pressão provocada principalmente pelo atrito entre o fluido e a parede do tubo. Os sistemas em fase diluída constituem atualmente na forma mais empregada e também estudada de transporte pneumático (Marcus *et al.*, 1990; Silva, 1997; Álvares, 1997).

Já sistemas em fase densa utilizam quantidades de gás menores ou transportam um volume maior de material, por isso o crescente interesse em se trabalhar com sistemas desse tipo. A fase densa caracteriza-se pela presença de aglomerados de partículas; valores de porosidade inferiores a 0,75 (Freire *et al.*, 1993) ou entre 0,60-0,80 (Leung *et al.*, 1976 in Narimatsu, 2000) e a densidade da suspensão é o fator dominante na queda de pressão ao longo do leito (Álvares, 1997). Porém, este modo de transporte é bem mais complexo. Modelos de escoamento no modo de fase densa podem variar desde as condições em que as partículas são transportadas na forma de pulsos, denominada fase densa com ‘*slugging*’, a situações em que diferentes regiões de transporte coexistem dentro da tubulação, tendo partículas transportadas pela região central do tubo e recirculação de algumas delas adjacentes à parede do mesmo (Capes e Nakamura, 1973). Dependendo das características dos sólidos, da velocidade do gás, vazão de sólidos e de fatores como a rugosidade do tubo, tamanho da tubulação, etc. o modelo de escoamento em fase densa pode variar de instável para estável ou num regime intermediário estável e instável (Marcus *et al.*, 1990).

Na transição entre os dois regimes de transporte num leito pneumático vertical, pode acontecer ainda um fenômeno conhecido como ‘*choking*’¹, que ocorre quando a transição entre as fases diluída e densa se dá de forma brusca. O

¹ Para o transporte pneumático horizontal, há um fenômeno equivalente, denominado ‘*saltation*’.

transporte de uma suspensão diluída dará lugar ao transporte de uma suspensão com maior concentração de sólidos, sendo que o fluido atinge uma velocidade crítica insuficiente para manter as partículas como uma suspensão uniforme, e estas são então transportadas na forma de pulsos (Satija *et al.*, 1985). Assim, o escoamento é instável e apresenta quedas de pressão elevadas e oscilatórias. O chamado '*choking point*' é então usado para definir a velocidade mínima de transporte estável num transportador pneumático vertical (Marcus *et al.*, 1990). Nesta situação, a preocupação está voltada para a previsão da ocorrência do '*choking*' e da velocidade a partir da qual esse fenômeno ocorre.

Vistas as possibilidades, a necessidade de identificar o tipo de escoamento de um sistema gás-sólido, para uma condição operacional, bem como a velocidade do gás na qual ocorrem as transições, é de fundamental importância para o projeto de transportadores pneumáticos, uma vez que os diversos modelos fluidodinâmicos apresentados pela literatura para a análise desses sistemas são restritos a regimes de escoamento específicos.

A princípio, a tendência é verificar o regime de operação através da porosidade, já que esta variável pode ser medida de forma praticamente direta e parece ser característica para cada modo de transporte. Contudo, no trabalho de Narimatsu e Ferreira (2001), no qual esferas de vidro e partículas de propileno de baixa densidade foram utilizadas, foi observado alto valor de porosidade tanto para fase diluída, o que já era esperado, quanto para a fase densa, onde um valor de porosidade mais baixo era previsto. Os valores de porosidade do trabalho ficaram entre 0,98 e valores superiores a 0,99 mostrando que a porosidade não

pode ser o único fator utilizado para a identificação do regime de escoamento de um sistema.

Rizk (1986) propôs um método de identificação de regimes baseando-se na construção de uma curva da queda de pressão por unidade de comprimento do tubo ($\Delta P/\Delta z$) em função da velocidade do ar (v), para uma vazão mássica de sólidos constante (W_s). Um exemplo típico desta curva está mostrado na Figura 2.1. A curva apresenta um ponto de queda de pressão mínima, que pode ser utilizado para representar a divisão entre as duas principais formas de escoamento de sólidos, densa e diluída, em tubos horizontais e verticais, sendo que a região de escoamento em fase diluída encontra-se no lado direito deste ponto, e a região de escoamento em fase densa, do lado esquerdo. A identificação do ponto de mínimo de forma visual depende muito do julgamento individual, e em algumas condições a localização precisa deste ponto pode não estar muito evidente. Nesse caso, uma equação polinomial pode ser ajustada aos dados experimentais e a velocidade mínima é encontrada através da primeira derivada da equação, fazendo-se esta derivada igual à zero.

Rizk (1986) também sugeriu uma equação empírica para estimar este ponto de mínimo, que leva em conta a influência de parâmetros geométricos (diâmetro de partícula e diâmetro da tubulação) e condições operacionais (vazões de ar e de sólidos). A equação proposta é apresentada a seguir:

$$\psi = \frac{1}{10^\delta} Fr^\chi \quad (2.1)$$

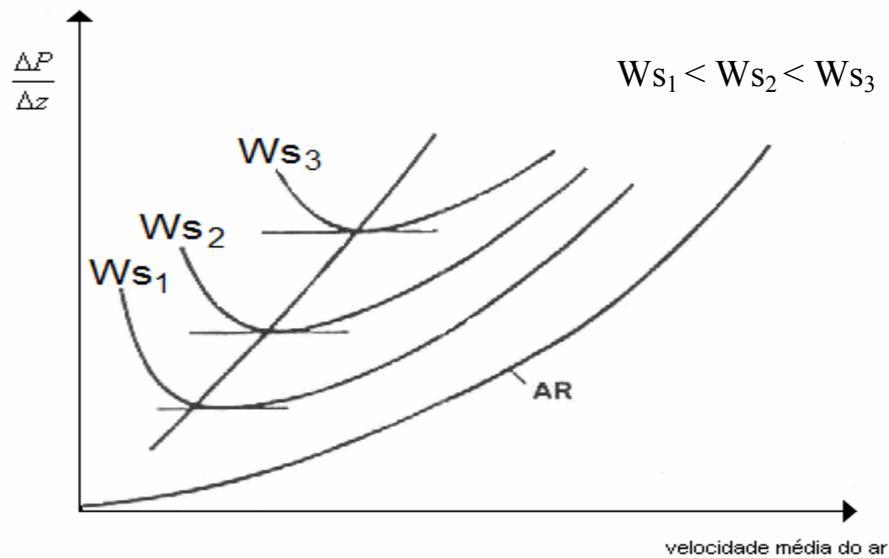


Figura 2.1 – Diagrama de queda de pressão no leito em função da velocidade do gás (Marcus *et al.*, 1990).

onde Ψ representa a razão entre as vazões mássicas de sólidos e gás ($\Psi = W_s/W_g$),

e Fr é o número de Froude, adimensional definido como:

$$Fr = \frac{v_f}{(D_t g)^{1/2}} \quad (2.2)$$

sendo v_f a velocidade superficial do gás; g a aceleração da gravidade e D_t o diâmetro da tubulação de transporte. Os expoentes δ e χ presentes na Equação 2.1 podem ser obtidos pelas seguintes relações:

$$\delta = 1,44dp + 1,96 \quad (2.3)$$

$$\chi = 1,1dp + 2,5 \quad (2.4)$$

onde dp , que é o diâmetro da partícula, é expresso em mm. Essas relações (Equações 2.3 e 2.4) são indicadas para valores de dp variando entre 0,4 e 6 mm.

Assim, realizam-se as substituições necessárias e como os valores de dp , D_t e W_s são conhecidos, o valor da velocidade do gás no ponto onde há mudança de regimes de escoamento é encontrado.

No estudo, já citado, de Narimatsu e Ferreira (2001), a correlação de Rizk foi usada para encontrar o valor do ponto mínimo de queda de pressão. Utilizando as equações originais de δ e χ , uma alta discrepância foi encontrada quando o valor predito era comparado com o valor experimental lido no gráfico de $\Delta P/\Delta z$ em função de v_f . As autoras concluíram que isso ocorria provavelmente porque as condições operacionais e as propriedades geométricas usadas no estudo eram diferentes das utilizadas no trabalho original. Então, os dados obtidos para as partículas de seu trabalho foram ajustados obtendo-se diferentes correlações para o cálculo de δ e χ . Com estas novas equações, os desvios entre os valores experimentais e os preditos variaram de 0,21 a 8,22%.

Cabe lembrar que este é apenas um dos métodos de identificação de regime de escoamento encontrados na literatura, existindo ainda diversos métodos não apresentados aqui, por não ser este o foco principal deste estudo. Salienta-se assim, a existência de uma discussão muito grande sobre os verdadeiros limites de cada regime, ocorrendo divergências entre os diversos autores sobre a forma de se definir e identificar esses limites (Álvares, 1997).

A previsão da ocorrência do ‘*choking*’ para um dado sistema gás-sólido, pode ser feita a partir de equações empíricas que dependem das propriedades do gás, do sólido e do diâmetro do tubo. Alguns desses métodos estão apresentados em Marcus *et al.* (1990). Um desses é o proposto por Yang (1978), que foi obtido

partindo-se do princípio que o transporte se torna instável quando a velocidade de ‘slug’ (v_b), que é relativa aos sólidos na fase densa, é maior que a velocidade terminal da partícula (v_t):

$$v_b > v_t \quad (2.5)$$

Onde v_b é dado por:

$$v_b = 0,35(gD_t)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Para os sistemas que apresentam o ‘choking’, é necessário identificar também a velocidade de ‘choking’ (v_c), que é a velocidade superficial do gás, para uma dada vazão de sólidos, onde tal fenômeno ocorre. Conhecer essa velocidade é importante uma vez que, em sistemas diluídos é aconselhável trabalhar com a menor velocidade de gás possível, para evitar erosão da tubulação, atrito das partículas e elevada perda de pressão. Marcus *et al.* (1990) apresentam algumas equações, todas de caráter puramente empírico, para a previsão da velocidade de ‘choking’.

Um exemplo é a metodologia de Yang e Keairns (1983), que pode ser utilizada tanto para sistemas com partículas uniformes como também para aqueles que apresentam distribuição granulométrica. As equações propostas por este modelo derivaram de balanços de força dos sólidos considerando as seguintes hipóteses: o fator de atrito partícula-parede (λ_z) no ‘choking’, é constante e igual a 0,01; a velocidade relativa entre o gás e o sólido é igual à velocidade terminal da partícula (v_t) e que $C_{D\varepsilon} = C_{D\infty} \varepsilon^{-4,7}$, sendo $C_{D\infty}$ a força de arraste de uma partícula isolada e $C_{D\varepsilon}$ a força de arraste de uma partícula presente num leito. As equações desta metodologia estão apresentadas a seguir:

$$\frac{2gd_T(\varepsilon_c^{-4,7} - 1)}{(v_c - v_t)^2} = 0,01 \quad (2.7)$$

$$v - v_{mf} - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) = (v_c - v_t)(1 - \varepsilon_c) \quad (2.8)$$

Resolvendo as duas equações simultaneamente, obtém-se a velocidade (v_c) e a porosidade de ‘*choking*’ (ε_c). A comparação entre os valores preditos e os dados experimentais mostrou que a velocidade de ‘*choking*’ é estimada com precisão de $\pm 50\%$. Assim, a utilização de um fator de segurança de 1,5 para o cálculo da velocidade é recomendado pelos autores. Além disso, os autores pedem cautela, uma vez que os experimentos foram obtidos para tubulações com diâmetro inferiores a 80 mm, tornando incerto o uso dessas equações para tubos de diâmetros grandes.

Outra forma proposta para a identificação do regime de escoamento e da ocorrência de ‘*choking*’ foi proposta por Satija *et. al.* (1985). Estes autores propuseram a utilização de dados da flutuação de pressão do sistema, uma vez que estes dados são obtidos com relativa facilidade. Os dados foram obtidos num transportador pneumático vertical, onde quatro tipos de partículas (esferas de vidro, areia fina, areia grossa e catalisadores de FCC) foram utilizados, sendo que três delas (exceto as esferas de vidro) apresentavam ‘*choking*’.

Os dados foram tratados estatisticamente, e os autores chegaram à conclusão de que, em fase diluída, as flutuações de pressão são muito pequenas, com amplitude da ordem da capturada por um transdutor operando num ambiente estático onde ocorre um ruído. Observaram também que a amplitude das

flutuações da pressão cresce quando se aproxima do ponto de ‘*choking*’, além de ocorrer uma mudança brusca da frequência dominante e do desvio padrão da flutuação da pressão.

Este método é aplicado no trabalho de Costa *et al.* (2004), onde os autores estudaram a aplicabilidade de métodos propostos na literatura para a identificação das transições entre os regimes de escoamento. O equipamento onde os dados experimentais foram obtidos era um leito pneumático vertical com alimentação do tipo leito de jorro. Além disso, variaram-se os diâmetros de partículas utilizados, porém todas eram pertencentes ao grupo D da classificação de Geldart (1973). Os autores mostraram que o método proposto por Satija *et al.* (1985) é eficaz na identificação da transição dos regimes e da velocidade de ‘*choking*’.

Finalmente, vale ressaltar que Marcus *et al.* (1990), fazem menção à necessidade de mais estudos e pesquisas para se determinar a confiabilidade de todos os métodos propostos para a situação de ‘*choking*’, para uma melhor compreensão deste assunto, que ainda não se encontra totalmente esclarecido.

2.1.2 – Constituição de um Transportador Pneumático

Essencialmente, um sistema de transporte pneumático é constituído por quatro secções (Marcus *et al.*, 1990). Na Figura 2.2 são mostradas de forma esquemática essas secções, caracterizando um sistema de transporte pneumático.

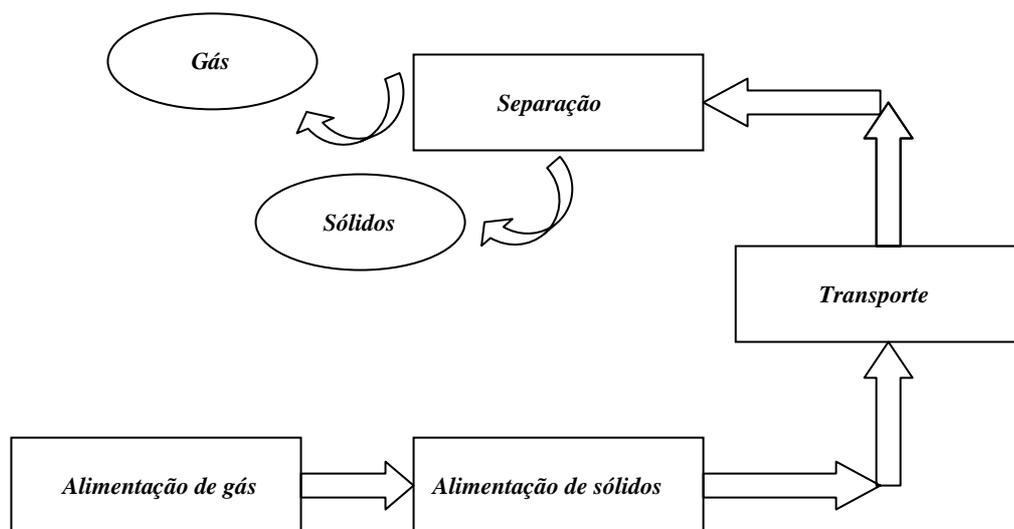


Figura 2.2 – O sistema de transporte pneumático (Marcus *et al.*, 1990).

A secção de alimentação de gás é uma das partes essenciais que constitui um transportador pneumático, pois ela é que provê a energia necessária ao ar de transporte, para que este carregue as partículas sólidas através da tubulação. A escolha do tipo de equipamento utilizado depende do intervalo ou valor da vazão de gás que será necessário e da pressão requerida no leito. Existem diversos tipos de equipamentos como compressores, ventiladores, sopradores e bombas a vácuo, e estes ainda podem possuir diversas potências.

A secção de alimentação de sólidos é uma das mais importantes de um transportador pneumático, pois nesta ocorre a mistura das partículas sólidas com a fase fluida. O fator que implica a esta região atenção especial está na ocorrência de uma grande mudança na quantidade de movimento das fases do sistema, pois os sólidos, que estão essencialmente em repouso, são misturados a corrente de gás, que já possui um perfil de velocidade plenamente desenvolvido. Essa mudança rápida da quantidade de movimento causa uma elevada perda de carga (Marcus *et al.*, 1990), podendo vir a comprometer a viabilidade de um

transportador pneumático. Como esta região do transportador é o principal foco deste trabalho, ela será detalhada posteriormente.

Uma vez misturados, os sólidos e o gás entram na zona de transporte, que é formada essencialmente pela tubulação. A escolha da tubulação depende de várias características como abrasividade do produto, pressão do sistema, etc. A zona de transporte pode adquirir diversas configurações dependendo da utilização, o que é uma das grandes vantagens desses sistemas. A flexibilidade de percurso é possível através da introdução de curvas na tubulação de transporte, causando a mudança da direção do escoamento. Porém, a presença de curvas em tubulações é bem conhecida por afetar a estrutura do escoamento gás-sólido, aumentando a queda de pressão e podendo causar grandes danos ao material. Diversos autores já estudaram o efeito desse acessório em transportadores pneumáticos abordando diferentes aspectos, tanto em análise experimental quanto numérica, como os trabalhos de Sharllert e Levy (2000), Kalman (2000), Akilli *et al.* (2001) e de Wang *et al.* (2004). Vale ressaltar que os resultados do estudo de Kalman (2000) enfatizam a necessidade da utilização de tubulações de transporte mais simples, evitando-se o uso desnecessário de curvas, pois este provou que percursos complexos geram uma maior perda de carga, o que obviamente é indesejado, uma vez que onera o sistema como um todo.

Finalmente, tem-se a região onde há a separação dos sólidos da corrente de gás. A análise desta zona geralmente só ocorre ao final num projeto de um transportador pneumático, porém um sistema mal dimensionado pode prejudicar a performance do equipamento ou mesmo inviabilizá-lo. Existem diversos tipos de equipamentos que podem ser utilizados na separação gás-sólido, como ciclones,

filtros, métodos gravitacionais, etc. A seleção do tipo de separador mais adequado para um dado sistema depende de diversos fatores, sendo que os primeiros a serem considerados são o tamanho da partícula e a eficiência de coleta almejada, além do potencial poluente dos sólidos do sistema. Outros fatores relevantes são: a queda de pressão total do sistema, a perda de partículas finas (pó), a segregação e degradação das partículas e o custo do sistema. Na Tabela 2.2, a eficiência de equipamentos de remoção de sólidos é apresentada para vários tamanhos de partículas. Teorias mais completas sobre cada um dos separadores gás-sólido, bem como as equações de projeto podem ser encontradas em Marcus *et al.* (1990) e em Perry (1999).

Tabela 2.2 - Eficiência de diversos equipamentos de separação gás-sólido para vários tamanhos de partículas (Marcus *et al.*, 1990).

<i>Equipamento</i>	<i>Eficiência (%)</i>		
	50μm	5μm	1μm
Coletor inercial	95	16	3
Ciclone de média eficiência	94	27	8
Ciclone de alta eficiência	98	42	13
Filtro industrial tipo 'shaker'	>99	>99	99
Filtro industrial tipo jato reverso	100	>99	99

2.2 – Alimentação no Transporte Pneumático

Como dito anteriormente, a zona de alimentação é considerada uma das áreas mais cruciais e importantes em um sistema de transporte pneumático. Na operação com esses leitos, a alimentação dos sólidos normalmente é um fator que pode vir a gerar muitos problemas, como a restrição da vazão máxima de

alimentação a valores relativamente baixos, alteração da estabilidade operacional e geração de elevadas quedas de pressão no leito (Ferreira, 1991; Arastoopour, 1986).

As flutuações na pressão do leito são causadas devido à brusca mudança de quantidade de movimento das fases, resultante da diferença entre a velocidade do sólido e a do gás no instante da mistura. Essa mudança rápida de quantidade de movimento, associado à turbulência do gás e do sólido no ponto de mistura, geram uma elevada perda de carga (Marcus *et al.*, 1990). Assim, fica evidente que para se obter uma operação efetiva de um sistema de transporte pneumático deve-se selecionar um alimentador que satisfaça tanto as exigências do material, quanto as do sistema, além de minimizar ao máximo a queda de pressão do equipamento.

A partir do ponto que ocorre a inserção dos sólidos na corrente de gás uma região para prover aceleração aos sólidos faz-se necessária. Essa região, chamada região de aceleração (ou comprimento de entrada), é caracterizada pela presença de gradientes de velocidade, quando sólidos e fluido são introduzidos no tubo de transporte com velocidades muito diferentes ocorrendo transferência de quantidade de movimento até que o sistema se estabilize. Neste ponto do sistema, as partículas aumentam sua velocidade do valor inicial (igual à zero ou um pouco maior) para valores finitos, determinados pelo balanço de forças agindo nos sólidos. Convencionalmente, o conhecimento da distância necessária para que as partículas sejam aceleradas e a estabilização seja alcançada é negligenciado. No entanto, isso pode gerar erros significativos, especialmente no caso de pequenas instalações de transporte e análises de seções específicas do leito, como por exemplo, curvas, bifurcações (Dzido *et al.*, 2002). O comprimento dessa região de

aceleração pode ser obtido experimentalmente, identificando-se a região não linear na curva da queda de pressão em função do comprimento do leito (Figura 2.3) (Silva, 1997).

O tipo de alimentador utilizado ainda tem influência relevante no comprimento da região de aceleração. Littman *et al.* (1993) observaram essa dependência do comprimento de entrada e o tipo de alimentador utilizado no sistema, fato também confirmado no trabalho de Osti (2003).

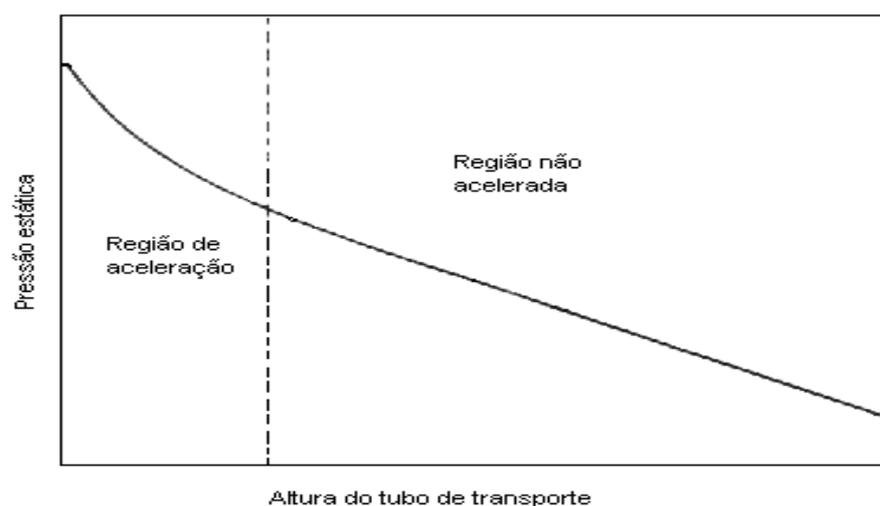


Figura 2.3 – Comportamento característico da pressão estática em função da altura do tubo de transporte, para o escoamento em fase diluída (Silva, 1997).

Dessa forma, a escolha adequada do alimentador para um sistema de transporte pneumático interfere drasticamente na viabilidade, tanto econômica quanto técnica, e na eficiência do transportador. Uma alimentação que permita bom controle de vazões, com distribuição uniforme e regular de sólidos durante a operação é essencial para o bom desempenho do sistema como um todo. Para isto, diversos critérios devem ser analisados, uma vez que diferentes condições de escoamento podem ser obtidas variando-se a geometria e as dimensões do

alimentador. Assim parâmetros relacionados ao material, ao sistema e a operação destes devem ser levantados e analisados com cautela.

Existem diversos tipos de alimentadores empregados em sistemas de transporte pneumático. Esses podem ser classificados de diferentes maneiras. Uma delas é através da limitação em relação à pressão, sendo: alimentadores a baixa pressão (até 100kPa), média pressão (até 300kPa) e alta pressão (até 1000kPa). Essa pressão limite está relacionada principalmente a propriedades de construção do alimentador e pressão relativa ao leito (Marcus *et al.*, 1990). Outra forma de classificação também empregada para os alimentadores, utilizada principalmente nas indústrias, os divide em volumétricos, que oferecem vazões volumétricas de sólidos constantes e gravimétricos, que oferecem vazões mássicas de sólidos constantes. Além disso, os alimentadores podem ser classificados conforme a dependência da vazão de sólidos em relação à vazão de gás (Feltran, 2005). Nessa classificação, há duas categorias: os independentes, que são basicamente os alimentadores mecânicos (parafuso helicoidal, válvula rotativa, válvula gaveta, etc.) e os dependentes da vazão de gás (válvulas “L”ou “J” , Venturi, tipo jorro, etc.).

Os sistemas mecânicos de alimentação de sólidos, como o alimentador tipo parafuso helicoidal, foram os primeiros a serem utilizados no passado. Hoje, porém, estão cada vez mais cedendo espaço para sistemas não mecânicos, tais como as válvulas do tipo L, J e V. Isto porque os sistemas mecânicos apresentam problemas freqüentes de desgaste e travamento, dificuldades mecânicas provocadas em condições mais drásticas de temperatura e pressão, além de maior custo de instalação e manutenção (Álvares, 1997). Já os sistemas mais atuais, não

apresentam problemas mecânicos, pois não possuem partes móveis e geralmente são mais baratos. Entretanto, como a vazão deles é dependente da vazão de gás de transporte, pode ocorrer uma restrição da vazão de sólidos a valores relativamente baixos e há a necessidade, na maioria dos casos, de inserção de aeração complementar, a fim de se evitar zonas de acúmulo de sólidos dentro do alimentador. Isso torna a fluidodinâmica do alimentador mais complexa e dificulta sua compreensão, o que por sua vez atrapalha a otimização da operação e do sistema em questão.

Em Marcus *et al.* (1990), os autores apresentam uma variedade de alimentadores, tanto os mais comuns quanto os mais específicos, discutindo detalhadamente sua aplicação, projeto e limitações. Quando possível, apresentam critérios de seleção bem como a adaptação de certos equipamentos para aplicações particulares.

São encontrados ainda na literatura trabalhos voltados para a caracterização de alimentadores, comparação entre diferentes tipos e proposta de novas configurações. Um estudo que sugere uma nova configuração para a alimentação em leito pneumático com reciclo de sólidos é apresentado por Ferreira (1991). A autora sugere como alimentador um leito do tipo jorro, sendo seu objetivo realizar a concepção do equipamento, colocando-o em condições operacionais. A seguir, a caracterização fluidodinâmica foi realizada a fim de se verificar a viabilidade do novo alimentador. Ferreira (1991) desenvolveu o equipamento e observou seu funcionamento aliado a boas condições operacionais. A autora também concluiu que o leito pneumático com alimentador tipo jorro é

um equipamento versátil, possibilitando o transporte estável de sólidos para uma ampla faixa de condições operacionais (Ferreira, 1991; Osti, 2003).

Posteriormente, Silva (1997) realizou um trabalho comparando os comportamentos fluidodinâmicos e operacionais de um leito pneumático, atuando com o alimentador tipo jorro proposto por Ferreira (1991) e com um alimentador do tipo parafuso helicoidal. Além da configuração do alimentador, os parâmetros diâmetro de partícula e diâmetro interno do tubo de transporte foram alterados. O autor também constatou a versatilidade do sistema com o alimentador tipo leito de jorro, ressaltando ainda essa vantagem face ao leito com o parafuso helicoidal. Ainda, essa configuração é isenta dos problemas mecânicos que normalmente ocorrem no parafuso, uma vez que não possui partes móveis. Os resultados encontrados mostraram que, para o sistema de alimentação tipo leito de jorro, a vazão de sólidos varia não somente com a vazão de gás, mas também com o diâmetro do tubo de transporte do leito e a distância entre a entrada desse tubo e o bocal redutor, presente na alimentação de ar (denominada distância Z_0). Já o tamanho da partícula não apresentou efeito significativo nas condições operacionais estudadas.

Já o trabalho realizado por Feltran (2005), teve como objetivo caracterizar o desempenho de uma válvula tipo “L” de pequeno diâmetro (23 mm) de forma isolada e operando num transportador pneumático. Nos ensaios experimentais foram realizadas as medidas de vazão de ar, vazão de sólidos e quedas de pressão (tubo de transporte, tubo de descida e válvula “L”). O diâmetro das partículas utilizadas também foi variado (1 mm, 470 μm e 260 μm) e o efeito deste parâmetro estudado.

A autora concluiu que o diâmetro médio da partícula exerce influência na vazão mínima de aeração da válvula, sendo que esta vazão aumenta com o aumento do diâmetro. Foi observado ainda que a perda de carga na válvula aumenta com o aumento da vazão de sólidos até um ponto onde se torna estável e que para a partícula de 260 μm a queda de pressão foi a menor encontrada, contestando resultados anteriormente apresentados na literatura para válvulas com diâmetros maiores que 25 mm. Finalmente, concluiu que válvulas de pequeno diâmetro operam de forma mais eficaz com partículas menores, pois altas cargas de sólidos são transportadas com um menor valor da relação entre as velocidades de aeração e mínima fluidização e com quedas de pressão equivalentes em condições análogas.

Pode-se observar assim a variedade de possibilidades para a configuração do sistema de alimentação de sólidos de um transportador pneumático. A seguir, as configurações de alimentação utilizadas neste estudo são discutidas em detalhes.

2.2.1 – Alimentador Gravitacional

A verticalidade em processos, especialmente quando se tem transporte de material é muito desejável, pois a influência da gravidade favorece esse transporte, promovendo uma economia energética. Por este motivo, dispositivos onde a força da gravidade desempenha papel essencial despertam grande interesse para o setor industrial (Feltran, 2005).

Além do fator econômico, os alimentadores gravitacionais ainda possuem uma configuração simples, facilitando sua construção e diminuindo os custos de investimentos. Um esquema de um alimentador gravitacional é apresentado na Figura 2.4 .

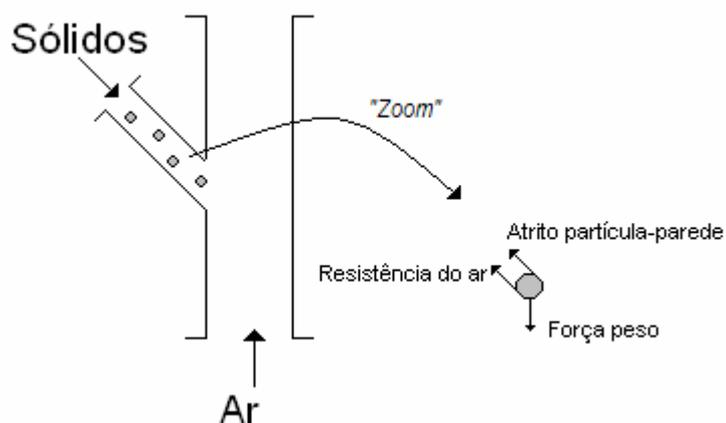


Figura 2.4 - Alimentador gravitacional.

O princípio de funcionamento que governa um alimentador gravitacional é o mesmo que o encontrado num 'hopper' (depósito alimentador), parte inferior de um silo. Num escoamento gravitacional é essencial que a força peso do material transportado seja superior à somatória das forças que oferecem resistência para esse escoamento, como o atrito partícula-parede e a resistência imposta pelo gás presente na tubulação, sendo este último o fator de maior relevância em transportadores pneumáticos, já que o gás de transporte tende a exercer uma força contrária ao escoamento dos sólidos. Um esquema dessas forças que atuam na partícula está ilustrado em destaque na Figura 2.4.

Diversos fatores influenciam na descarga de um silo, estando os mesmos também presentes num alimentador gravitacional. São eles: ângulo de descarga,

tamanho do bocal na saída, tamanho da partícula, formato, distribuição granulométrica, densidade, coesividade, temperatura do produto e umidade.

O tamanho da partícula é um dos fatores mais comuns que afetam diretamente a fluidez do material. A umidade é outro fator. A maioria dos materiais possui um ponto limite de absorção de água. Se este valor é extrapolado, problemas significativos na vazão de material ocorrem. A umidade pode ser reduzida adicionando ao processo uma operação de secagem, porém esta etapa gera um custo adicional. Temperaturas elevadas também geram sérios problemas, especialmente quando o material contém glúten, açúcar e outros componentes solúveis com baixo ponto de ebulição. Estes materiais tornam-se pegajosos a temperaturas acima da temperatura de transição vítrea, fazendo necessária assim a instalação de equipamentos de resfriamento, gerando o já comentado custo extra, como no caso da umidade (Perry, 1999).

Perry (1999) apresenta como metodologia para o projeto de silos, que pode ser em parte estendida para os alimentadores gravitacionais, a teoria proposta por Jenike (1961). Trata-se de um método quantitativo que permite determinar as dimensões que resultarão em uma determinada vazão de sólidos para o *'hopper'* de um silo.

Um estudo nessa área, que pode ser citado, foi o desenvolvido por Verghese e Nedderman. (1995), que teve como objetivo estudar duas correlações propostas na literatura para a determinação da vazão de sólidos em *'hoppers'* cônicos, bem como propor uma correlação para partículas com diâmetros inferiores a 500 μm . Os testes foram realizados para diversas séries de areia com

diferentes diâmetros de partícula, variando-se também o ângulo e o diâmetro do bocal de descarga.

As correlações propostas na literatura e analisadas no trabalho apresentaram desvios inferiores a 10% entre os valores preditos e experimentais para partículas grossas. Já para partículas com diâmetro inferior a 600 μm , os resultados encontrados nos experimentos foram bem inferiores aos encontrados pelas correlações. Finalmente, uma característica notável encontrada nos resultados foi a independência da vazão de partículas finas em relação ao ângulo de descarga para uma faixa de valores desse ângulo maior que no caso das partículas grossas.

2.2.2 – Bocal Redutor

Um problema que geralmente ocorre em sistemas de alimentação gravitacional de leitos pneumáticos, como o mostrado no tópico anterior, é que, para certas condições operacionais, parte do ar de transporte segue pela tubulação de alimentação de sólidos (Osti, 2003). Dessa forma, tem-se um desperdício de energia, já que somente parte do ar alimentado é que está sendo utilizado para mover as partículas ao longo do leito. Além disso, esse ar desviado pode vir a criar uma resistência ao escoamento dos sólidos no alimentador, podendo chegar até a bloquear esse escoamento. Esses comportamentos criam instabilidades inerentes ao alimentador, tornando o fenômeno que ocorre no ponto de alimentação de sólido cada vez mais complexo.

Denomina-se bocal redutor um dispositivo que faz com que a região pela qual o ar está sendo alimentado seja estrangulada, e, devido a essa constrição, a velocidade do ar aumenta e o direciona para o centro do tubo de transporte, como um jato de ar (formação de “*vena contracta*”), diminuindo a quantidade de ar desviado pela alimentação de sólidos e amenizando as instabilidades do trecho (Osti, 2003). Esse dispositivo tem ação comparada com a de um Venturi, porém com alimentação fora da região estrangulada e região após a alimentação com comprimento bem menor, não permitindo que o ar restabeleça sua velocidade inicial, causando uma queda de pressão permanente. A Figura 2.5 mostra um esquema do bocal redutor.

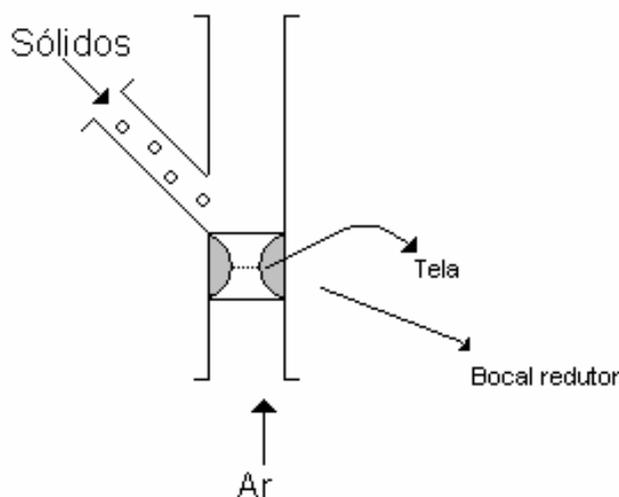


Figura 2.5 – Bocal redutor.

Um dos fatores mais relevantes desse bocal é a porcentagem de redução da área de escoamento gerada pela sua presença. Osti (2003) realizou um estudo num leito pneumático com alimentador tipo jorro com tubo de transporte de 24,3 mm de diâmetro, onde dois bocais foram avaliados, um com 65% (configuração 1) e outro com 43% (configuração 2) de redução de área. Além dessas configurações,

a autora considerou uma terceira, que é o alimentador na ausência de bocal redutor.

Como já dito, sabe-se que alimentadores tipo jorro possuem vazão de sólidos vinculada à vazão de ar. A autora concluiu neste trabalho que essa dependência é afetada pelo tipo de configuração utilizada no alimentador. Para a configuração 1, a vazão de sólidos aumenta com o aumento da vazão de gás, já para a configuração 2, essa relação é o contrário, ou seja, a vazão de sólidos diminui com o aumento da vazão de ar. No caso de alimentador sem bocal, houve uma redução bem significativa da faixa operacional para a vazão de ar do leito, além de um funcionamento instável, o que descarta a utilização desta configuração em qualquer caso. Para as configurações 1 e 2, ambas podem ser utilizadas, dependendo das condições operacionais desejadas para o leito pneumático.

Outro trabalho que relata o uso de bocais redutores é o de Silva (1997). O autor utilizou esse dispositivo com o objetivo de minimizar as instabilidades da alimentação e aumentar a reprodutibilidade dos dados. O autor obteve os resultados esperados, constatando ainda que a presença do bocal redutor permite um menor comprimento da região de entrada do leito. No trabalho de Osti (2003) chegou-se a esta mesma conclusão, que corrobora a conclusão de Littman *et al.* (1993), de que a configuração do alimentador e o comprimento da região de aceleração estão associados.

2.2.3 – Alimentador Venturi

O Venturi é um dos dispositivos de alimentação mais simples empregado em sistemas de transporte pneumático e apresenta grande eficiência do ponto de vista mecânico, por isso sua popularidade em processos industriais. Exemplos de aplicação podem ser encontrados em diversos segmentos, como no transporte de produtos agrícolas, como cevada, trigo, milho, etc.; na indústria alimentícia, na produção de batata ‘chips’ e também no sistema de transporte de moedas em postos de pedágio (*‘bottle tops’*) (Marcus *et al.*, 1990).

O Venturi é constituído de três partes: *o cone de entrada*, que aumenta a velocidade do fluido de forma progressiva, *a parte intermediária cilíndrica*, onde uma região de pressão negativa é formada, devido à alta velocidade do fluido, e na qual os sólidos são inseridos, e *o cone de saída*, que diminui, também de forma progressiva, a velocidade da mistura gás-sólido até valores próximos da velocidade anterior ao dispositivo (Jitschin, 2004). A Figura 2.6 mostra, de forma esquemática, o alimentador Venturi.

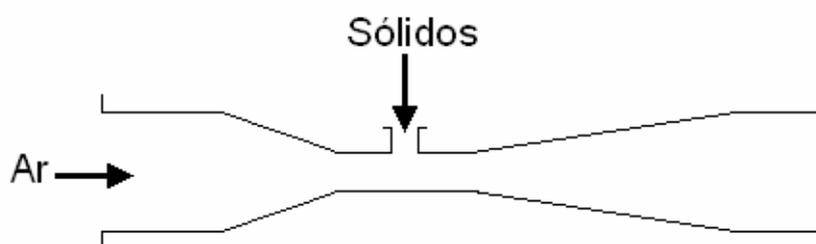


Figura 2.6 – Alimentador Venturi (Marcus *et al.*, 1990; Jitschin, 2004).

Assim, a idéia básica de um Venturi é obter uma elevada queda de pressão entre a entrada e a “garganta” do Venturi, mas uma queda de pressão pequena entre a entrada e a saída desse dispositivo. O perfil do comportamento da pressão ao longo de um Venturi está apresentado de forma qualitativa na Figura 2.7. Ressalta-se ainda que a queda de pressão entre a entrada e a “garganta” num alimentador Venturi é superior a de um medidor Venturi, uma vez que no primeiro tem-se o orifício de alimentação na parede da “garganta”. Essa perda de carga adicional deve-se a descontinuidade causada pelo orifício na superfície da seção e à introdução de material no ponto (Marcus *et al.*, 1990).

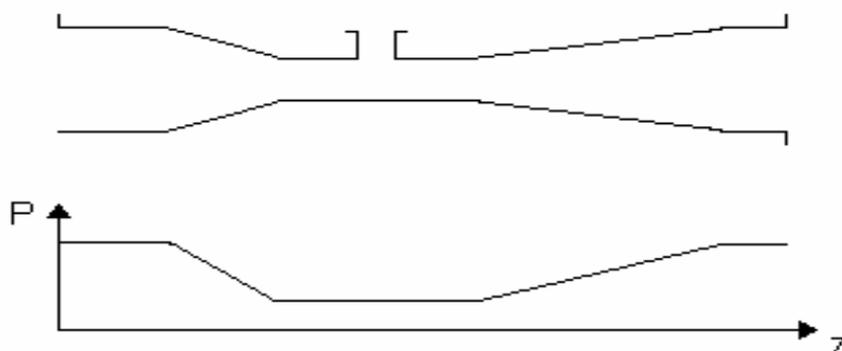


Figura 2.7 – Perfil de pressão ao longo de um Venturi (Jitschin, 2004).

No projeto desse dispositivo, têm-se duas opções: o Venturi clássico ou Venturi modificado. O Venturi clássico foi o proposto por Hershel em 1887 e apresenta algumas medidas pré – definidas, como o ângulo do cone de entrada de 21° e ângulo do cone de saída de 8°, além das distâncias das tomadas de pressão. Já nos Venturis modificados, algumas dessas relações são alteradas. A intenção dessa mudança no Venturi clássico é reduzir as seções ao máximo, para manter a perda por atrito com a parede pequena. No entanto, a mudança entre as seções

precisam ser as mais suaves possíveis, mantendo assim as características do escoamento dentro do Venturi (Jitschin, 2004).

A grande vantagem deste alimentador reside no fato de que, num Venturi, a corrente fluida acompanha constantemente as paredes da tubulação, o que faz com que a perda de carga residual produzida seja pequena, quando comparada com a de outros tipos de alimentadores de mesmo princípio (construção). Esta característica torna a utilização do Venturi bastante interessante do ponto de vista industrial, pois influi de maneira significativa na questão econômica do processo onde este está inserido. Porém, o mesmo apresenta desvantagens, como restrição da vazão de sólidos a valores relativamente baixos.

2.3 – Pressão no transporte pneumático

Um fluido puro escoando sofre a ação de muitas forças, que alteram diversos fatores dessa massa fluida, como pressão, temperatura, tensão e deformação (Perry, 1999). Se partículas são inseridas nessa corrente fluida a grandeza de algumas dessas forças são alteradas, além de surgirem outros fatores, como forças eletrostáticas, atrito, etc. (Marcus *et al.*, 1990).

A alteração da pressão de uma mistura que escoar ao longo da distância, denomina-se queda de pressão, e constitui o principal dado em projetos de transportadores pneumáticos (Ferreira, 1996). Isso porque a queda de pressão nada mais é do que um indicativo da perda de energia do sistema, sendo necessário suprir este prejuízo para que o transporte ocorra de forma satisfatória.

Num transporte pneumático, múltiplos fatores contribuem para um aumento da queda de pressão total (ΔP), como a queda de pressão associada ao escoamento do gás puro; o atrito partícula-parede, que ocorrem devido às colisões randômicas dos sólidos com a tubulação de transporte e o atrito partícula-partícula, gerado pelas colisões aleatórias entre as partículas transportadas. Há ainda fatores relacionados ao escoamento da partícula. Dependendo do tamanho e natureza das partículas e ainda das condições operacionais, forças eletrostáticas e forças coesivas podem contribuir na grandeza desse parâmetro (Marcus *et al.*, 1990). A presença de acessórios no percurso do transportador, como curvas, contribui também para um aumento de ΔP .

A desvantagem de altos valores de ΔP está relacionada de forma direta com os custos de aquisição e operação de um leito pneumático, já que a necessidade de uma alimentação de gás mais potente onera o sistema, como já discutido nesse trabalho. Assim, a minimização desse parâmetro é um dos principais objetivos na otimização de um processo desse tipo. Nota-se ainda, ao longo dessa revisão que essa variável pode ser utilizada para se obter outras informações do sistema, como, por exemplo, o regime de escoamento.

As equações e correlações disponíveis para a estimativa de ΔP ainda dependem de um grande número de parâmetros empíricos. Em Marcus *et al.* (1990) têm-se diversos procedimentos para o cálculo da queda de pressão em sistemas pneumáticos, tanto para operação em fase diluída quanto para a fase densa.

A obtenção experimental de medidas de pressão normalmente são simples de serem efetuadas e não envolvem grandes dificuldades, exceto em situações de

escoamento instável, nas quais os valores oscilam em função do tempo. Neste caso, é recomendável a utilização de transdutores de pressão, que registram os valores instantâneos da pressão em função do tempo, podendo-se assim, monitorar as variações existentes (Ferreira, 1996).

Após a revisão apresentada sobre alguns aspectos relativos ao transporte pneumático, focando especialmente a região de alimentação de sólidos, nota-se que mais estudos devem ser realizados para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem. Esse trabalho procurou contribuir nesse sentido, realizando o estudo das variáveis operacionais com diferentes configurações de alimentadores. Os materiais e a metodologia utilizados para este estudo estão apresentados a seguir.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Materiais

A escolha do material a ser utilizado como fase particulada num transporte pneumático em qualquer estudo requer uma análise preliminar, que leva em conta as características do leito utilizado. Para a escolha do diâmetro de partícula, parâmetros como o diâmetro da tubulação de transporte e os métodos de medidas das variáveis que serão aplicados devem ser considerados a fim de se observar a compatibilidade entre as partes. Já a escolha da densidade do material está vinculada principalmente com a velocidade máxima do ar fornecido pela alimentação de gás e as necessidades particulares do estudo.

Nesse estudo esferas de vidro de densidade 2500 kg/m^3 foram utilizadas como material particulado no escoamento gás-sólido. Dois diâmetros de partículas foram utilizados: 0,85 mm, pertencentes ao grupo B da classificação de Geldart e 2,0 mm, pertencentes ao grupo D da citada classificação (Marcus *et al.*, 1990). Assim, a influência do diâmetro da partícula na análise realizada será investigada. Já a escolha do formato esférico das partículas teve como objetivo a simplificação do estudo, e, em relação à escolha do material, facilidade de aquisição também foi um fator considerado.

3.2 – Equipamento

Para a realização desse estudo foi usado um ‘loop’ disponível no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Este ‘loop’ é constituído por um trecho ascendente, duas curvas de 90°, trecho descendente, vaso coletor de sólidos e um sistema de alimentação. A Figura 3.1 mostra o esquema do equipamento.

A linha de transporte foi construída em ferro galvanizado ($d_T = 53,4$ mm) e as curvas de 90° em acrílico ($d_T = 53,4$ mm), com a finalidade de permitir a visualização do escoamento e obter maior segurança em relação ao vidro. As curvas de 90° foram colocadas em série de maneira a se obter uma curva de 180°, interligando as seções de escoamento ascendente ($L=3,4$ m) e descendente ($L=2,0$ m).

Um soprador do tipo ventilador axial de 7,5HP foi instalado para fornecimento de ar. Ao ser acionado, ele injeta ar em uma tubulação de 53,4 mm de diâmetro, que é conectada à linha de transporte. Os sólidos são então descarregados nesta linha e transportados ascendentemente no tubo de transporte, escoam através das curvas e retornam na seção descendente, e são descarregados no reservatório de sólidos, estabelecendo um movimento cíclico.

O sistema de alimentação de sólidos do leito é removível. Assim, três diferentes tipos de configurações foram acopladas ao leito para a realização do estudo: o alimentador gravitacional; o alimentador gravitacional combinado com bocal redutor e o alimentador gravitacional combinado com Venturi.

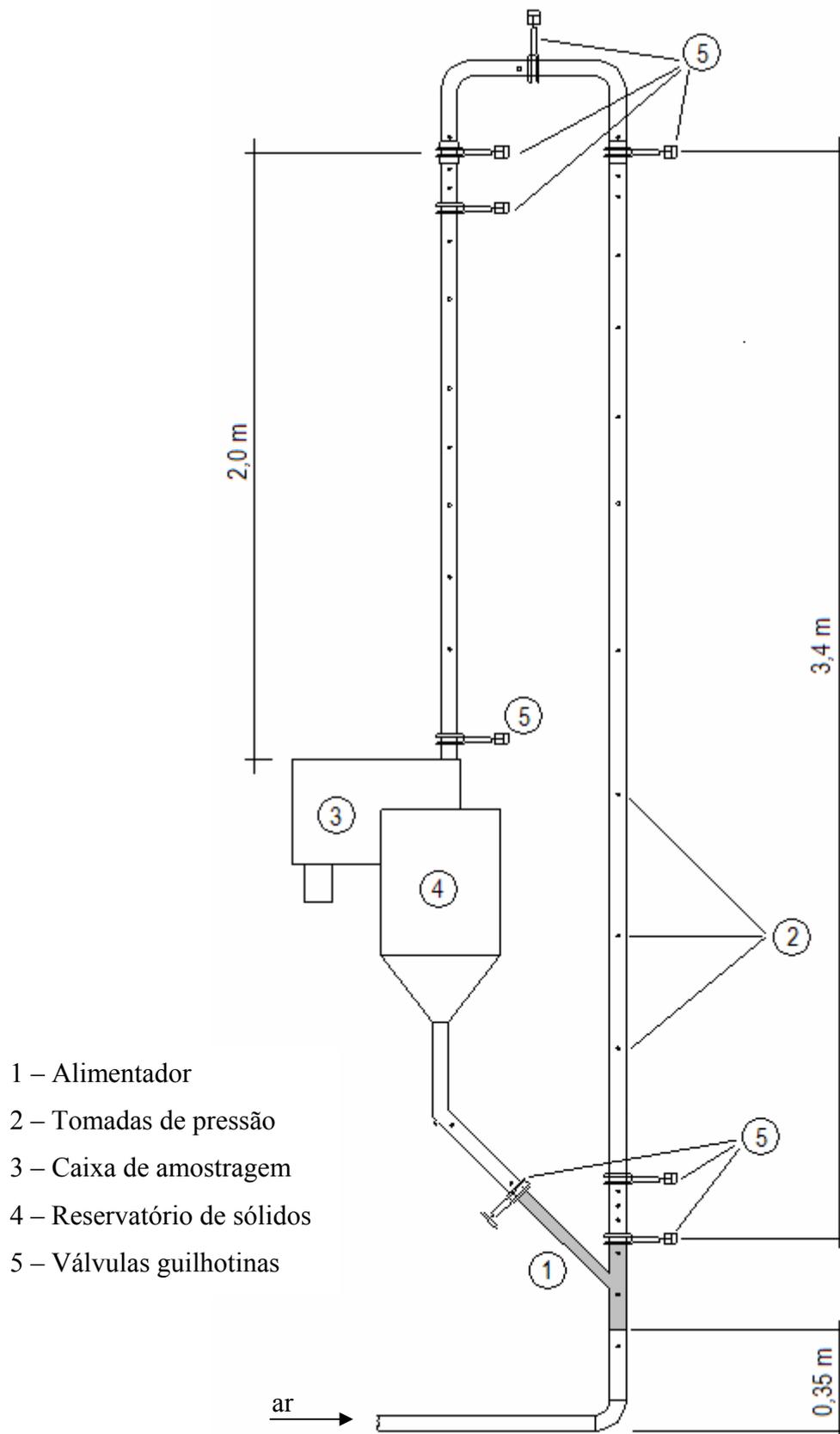


Figura 3.1 – Linha de transporte pneumático.

O alimentador do tipo gravitacional, base de todas as configurações analisadas, é constituído de um reservatório de sólidos com corpo cilíndrico de diâmetro igual a 0,3 m e base cônica conectada a um tubo de diâmetro de 53,4 mm e ângulo de inclinação de 45° .

O alimentador do tipo gravitacional sem restrição é constituído de três regiões: um reservatório de sólidos, uma tubulação com ângulo de inclinação de 45° e uma região de descarga de sólidos na linha de transporte. Essas regiões são acopladas na ordem em que estão descritas. As outras configurações analisadas aqui se originaram de modificações realizadas na geometria da região de descarga de sólidos. A Figura 3.2 ilustra todos os sistemas de alimentação propostos e suas dimensões.

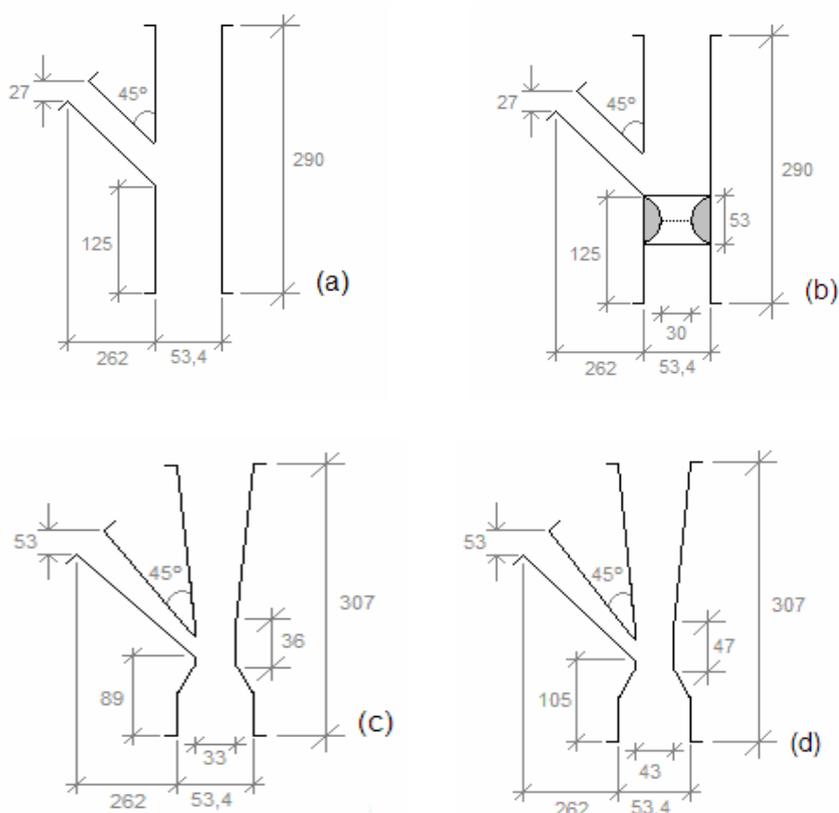


Figura 3.2: Configurações de alimentação. (a) Sem restrição; (b) bocal redutor; (c) Venturi 33 mm; (d) Venturi 43 mm. Desenhos fora de escala; dimensões em mm.

Em todas as configurações o princípio de funcionamento é um só, sendo que os sólidos contidos no reservatório escoam por gravidade até a entrada do leito. A vazão de sólidos no sistema de alimentação é fixada controlando-se a área de escoamento, com o auxílio de uma válvula tipo guilhotina de acionamento manual.

3.3 – Técnicas de medidas

As variáveis medidas neste trabalho foram a vazão volumétrica de ar alimentada ao sistema; a vazão mássica de sólidos presente no transportador e a pressão estática ao longo do leito bem como sua flutuação com o tempo em cada trecho do sistema. As técnicas utilizadas para a obtenção dessas medidas estão dispostas a seguir.

3.3.1 – Vazão volumétrica de ar

A vazão de ar alimentada ao sistema foi ajustada por duas válvulas manuais tipo gaveta, localizadas logo após o soprador sendo que uma se encontra na própria linha de alimentação, enquanto a outra se localiza num ‘*by pass*’ após a primeira válvula. O valor dessa vazão foi determinado por um medidor tipo Venturi, localizado à frente do desvio e conectado a um manômetro tipo tubo em “U”, onde a leitura da queda de pressão era realizada. Com este valor de ΔP determinado, através da relação vazão e queda de pressão dada pela Equação 3.1, calculava-se a vazão de ar.

$$Q_f = 1,18 \sqrt{\frac{\Delta h T}{P_{atm}}} \quad (3.1)$$

Onde: Q_f = vazão volumétrica de ar (m³/min).

Δh = diferença de altura entre as colunas de água do manômetro tubo em U (cm col. H₂O).

T = temperatura do leito (K).

P_{atm} = 1034 cm col. H₂O.

Esta relação é válida para o intervalo: $0,5 \leq \Delta h \leq 93$ cm col. H₂O.

Como dito anteriormente, sabe-se que em alimentadores gravitacionais, parte do ar alimentado ao leito é desviada para o tubo de alimentação de sólidos. Para medir essa perda, dois pontos de medida de pressão foram instalados no tubo de alimentação, espaçados de uma distância de 0,69 m. Com essas informações a queda de pressão (ΔP^*) no tubo de alimentação foi determinada.

Conhecido o valor desse ΔP^* e o diâmetro do tubo, utilizou-se a metodologia aplicada nos trabalhos de Ferreira (1996) e Patrocínio (2005) para o cálculo da vazão de ar nessa região. Essa metodologia utiliza a equação de Forcheimer para a estimativa da velocidade de escoamento do ar nesse trecho.

$$\frac{\Delta P^*}{l} + \rho_f g = \frac{\mu}{\kappa} v_f + \frac{c \rho_f}{\sqrt{\kappa}} v_f^2 \quad (3.2)$$

Onde: ρ_f = densidade do ar (kg/m³)

μ = viscosidade do ar (kg/(m.s))

κ = permeabilidade do leito poroso (m²)

c = constante.

A permeabilidade foi estimada pela equação de Kozeny-Carman, onde κ depende da porosidade do leito e do diâmetro e da esfericidade das partículas que

40constituem o leito. Considerando o valor de porosidade média 0,4 (valor usualmente adotado para leitos deslizantes constituído por esferas), c e κ podem ser estimados a partir das equações:

$$\kappa = \frac{dp^2 \varepsilon^3}{36\beta'(1-\varepsilon)^2} \quad (3.3)$$

$$c = \frac{0,14}{\varepsilon^{3/2}} \quad (3.4)$$

Os valores encontrados para κ foram $1,09 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ para $dp = 2 \text{ mm}$ e $6,04 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ para $dp = 0,85 \text{ mm}$. β' é uma constante presente na equação de Kozeny-Carman e tem valor $\beta'=5,0$, recomendado para leitos com partículas de formato arredondado. A constante c foi estimada em 0,48.

3.3.2 – Vazão mássica de sólidos

A caixa de amostragem instalada acima do reservatório de sólidos foi projetada para permitir o desvio da direção do escoamento através do acionamento de uma alavanca e está apresentada de forma esquemática na Figura 3.3. Com isto os sólidos podem ser coletados para se determinar a vazão mássica das partículas. O valor da vazão de sólidos é obtido através da pesagem dos sólidos desviados para o amostrador, durante um tempo de coleta determinado e medido com o uso de um cronômetro. Com esses dados, calcula-se a vazão mássica de sólidos através da seguinte equação:

$$W_s = \frac{\text{massa}_{\text{coletada}}}{\text{tempo}_{\text{de}_{\text{coleta}}}} \quad (3.5)$$

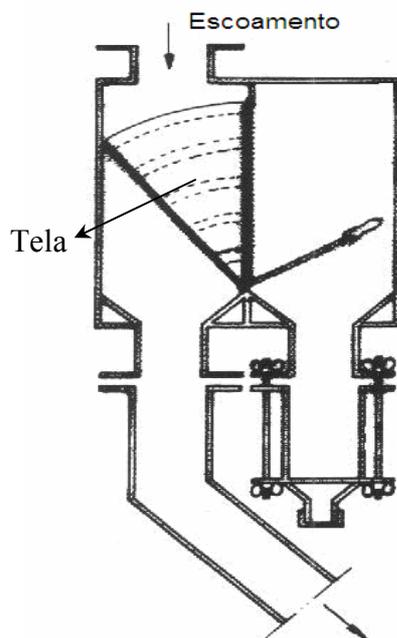


Figura 3.3 – Caixa de amostragem de sólidos.

3.3.3 – Pressão estática

Ao longo da linha de transporte existem, 28 tomadas de pressão, sendo que estas abrangem inclusive as singularidades do ‘loop’ (entrada e curva). Essas tomadas de pressão estão conectadas a manômetros em “U” com água como fluido manométrico. Para facilitar a localização destes pontos neste estudo, definiu-se uma variável ζ , que é a medida linear do leito pneumático e tem variação de zero a 7,19 m. A posição $\zeta = 0$ está situada no primeiro ponto de medida de pressão e $\zeta = 7,19$ m está no ponto de descarga dos sólidos no reservatório. A Tabela 3.1 apresenta a posição dos pontos de medidas de pressão no leito. As regiões de transporte no trecho estão dispostas da forma que segue: $0 \leq \zeta \leq 0,3$ m tem-se a região de alimentação de sólidos; $0,3 \text{ m} \leq \zeta \leq 4,27$ m trecho

ascendente; $4,27 \text{ m} \leq \zeta \leq 4,90 \text{ m}$ curva de 180° e $4,90 \text{ m} \leq \zeta \leq 7,19 \text{ m}$ trecho descendente.

Ito (1960) observou que, nas proximidades de uma curva de 90° , as medidas de pressão estática variam de acordo com a posição angular, em decorrência da existência de um perfil de velocidades não uniforme na entrada da curva. Assim, para efetuar medidas de pressão nas proximidades das curvas foram utilizados anéis piezométricos (Kavassaki, 1985), com o objetivo de minimizar erros de medidas provocados pela não uniformidade do escoamento (Patrocínio, 2005). As localizações desses anéis piezométricos estão indicadas na Tabela 3.1 pelo símbolo *.

Estão presentes ainda na linha de transporte, seis pontos onde a pressão foi medida por meio de transdutores de pressão. Essa medida com transdutor foi realizada para que as oscilações que ocorrem neste parâmetro possam ser melhor quantificadas, uma vez que os transdutores são mais sensíveis, o que não é possível utilizando apenas os manômetros tubo em “U”. Além disso, os manômetros em “U” servem como referência para verificar a aferição dos transdutores de pressão, o que justifica a medida utilizando os dois dispositivos. A aquisição de valores instantâneos de pressão estática no leito foi obtida por um tempo de 57,35 segundos (Taxa de aquisição: 20 Pontos/s; número de pontos amostrados: 1148). Os transdutores estão dispostos ao longo de todo o transportador e suas localizações estão também indicadas na Tabela 3.1 pelo símbolo †.

Tabela 3.1 – Localização das tomadas de pressão, anéis piezométricos e transdutores de pressão em relação à variável ζ .

Ponto	ζ (m)	Ponto	ζ (m)	Ponto	ζ (m)
1	0	11	3,25	21	5,54 *
2	0,14	12	3,56	22	5,64
3	0,3†	13	3,81	23	5,77
4	0,71	14	4,02	24	6,28
5	0,76	15	4,12	25	6,49†
6	0,81†	16	4,17 *†	26	6,69
7	1,45	17	4,27 *	27	6,94
8	1,94	18	4,8 *†	28	7,19
9	2,44	19	4,9 *†		
10	2,95	20	5,43 *		

(*) – Anel piezométrico

(†) – Transdutor de pressão

Satija *et al.*(1985) ressaltaram a necessidade de se utilizar orifícios pequenos na parede do tubo para medidas de pressão utilizando manômetros em “U” e transdutores, para que apenas as propriedades pontuais no nível do orifício sejam detectadas. Observou ainda que a mangueira que liga o ponto de medida ao manômetro e/ou transdutor, deve ter o menor comprimento possível, para evitar erros nos pontos experimentais devido ao tempo de atraso das medidas realizadas. No presente trabalho, essas observações realizadas por Satija *et al.* (1985) foram acatadas.

3.4 – Procedimento experimental

As variáveis manipuladas foram as vazões de ar (Q_f) e de sólidos (W_s). Quando o leito operou sem partículas a vazão volumétrica de ar variou de zero até o limite máximo de ar alimentado pelo soprador utilizado; já com a presença de sólidos, o valor da vazão de ar variou desde o mínimo requerido para se iniciar o transporte das partículas até o máximo fornecido pelo soprador. As vazões mássicas de sólidos sempre variaram de zero até o máximo permitido pela válvula de ajuste (válvula guilhotina manual).

3.4.1 – Obtenção dos dados experimentais

A seqüência realizada para a obtenção dos dados experimentais está descrita a seguir:

- 1) Introdução das esferas de vidro no reservatório de sólidos.
- 2) Acionamento do soprador que fornece ar para o transportador.
- 3) Ajuste da vazão mássica dos sólidos através da válvula guilhotina manual, sendo as medidas realizadas nos seguintes valores de W_s : 0,0; 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 e W_s máximo (válvula guilhotina totalmente aberta), em kg/s, com incerteza na medida desta variável estimada em $\pm 5,5\%$ ².
- 4) Espera da estabilização térmica do leito por 2 horas. A estabilização foi averiguada pela medida da temperatura na linha de fornecimento de ar,

² Estimado pela metodologia descrita por Montgomery (em Patrocínio, 2005).

anterior ao ponto de alimentação de partículas. O tempo de 2 horas foi determinado a partir da construção de um gráfico que mostra a variação da temperatura no interior do leito ao longo do tempo. A variação típica para o sistema estudado está apresentada na Figura 3.4 e é válida para todas as condições aplicadas e mostra que no tempo de 1,5 horas a temperatura estabiliza. Assim, um acréscimo de 30 minutos foi admitido a fim de garantir a condição estável de operação.

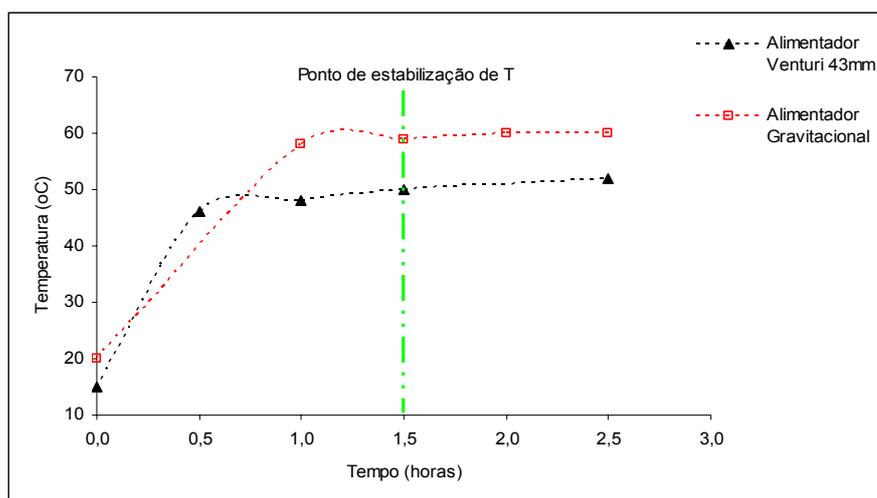


Figura 3.4 – Temperatura em função do tempo para os alimentadores gravitacional e gravitacional combinado com Venturi 43 mm.

- 5) Determinação da queda de pressão no Venturi, para cálculo da vazão volumétrica de ar alimentada ao sistema.
- 6) Leitura dos valores de pressão nos 28 pontos presentes no leito mais a pressão no tubo de alimentação de sólidos.
- 7) Aquisição dos dados dos transdutores de pressão.

Essas etapas foram repetidas para cada vazão de ar. Depois que o intervalo de Q_f foi todo percorrido, uma nova vazão de massa de sólidos foi ajustada e o ciclo reiniciado. Nesse ponto, o tempo de estabilização do leito reduziu-se de 2 horas para 30 minutos em média. Leituras da temperatura de 10 em 10 minutos foram realizadas e quando três medidas subseqüentes possuíam uma variação de $\pm 1^\circ \text{C}$, admitia-se operação no estado estacionário.

3.4.2 – Reprodutibilidade das medidas experimentais

O critério adotado para a obtenção de todos os dados experimentais deste trabalho foi realizar as medidas em duplicata e mediante qualquer resultado fora da tolerância estipulada, mais medidas foram realizadas, até se alcançar a condição limitante. O ajuste dos dados de pressão foi determinado através de uma função resíduo, definida como a diferença entre as duas medidas realizadas, sendo o valor máximo permitido para este resíduo 1 kPa, que equivaleria a um erro próximo a 1%.

Em todo o processo de aquisição de pontos experimentais deste trabalho o critério descrito foi alcançado, mostrando a reprodutibilidade dos pontos experimentais utilizados nas análises realizadas.

Utilizando a metodologia descrita, para cada configuração de alimentação foram obtidos os perfis de pressão ao longo da tubulação, para o leito operando sem e com partículas de 0,85 e 2,0 mm. A estrutura de análise dos dados obtidos está descrita a seguir:

- a) análise da fluidodinâmica apenas com ar para as configurações sem restrição, com bocal redutor e com Venturi 33 mm e comparação dessas configurações;
- b) avaliação da influência da presença das partículas, focando estabilidade, perda de carga e escoamento ao longo do leito (regime de transporte e estabilidade);
- c) verificação da influência do tamanho da partícula nos aspectos citados anteriormente;
- d) comparação da fluidodinâmica do leito operando com alimentador combinado com Venturi com ambos os diâmetros de “garganta” (33 e 43 mm) para identificação da influência deste parâmetro na fluidodinâmica deste tipo de alimentador e do leito como um todo e
- e) avaliação das modificações realizadas no alimentador gravitacional mediante eficiência em relação à inserção de sólidos no sistema.

Os resultados obtidos e suas análises detalhadas estão no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Leito operando sem partículas

Cada tipo de alimentador caracterizou o intervalo operacional de ar do sistema de transporte pneumático. Nos casos avaliados quando o leito está sem partículas, a diferença foi encontrada para os valores máximos, sendo esses valores apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores máximos de vazão de ar para cada configuração de alimentação quando o leito opera sem partículas.

<i>Configuração</i>	<i>Q_f máximo (m^3/s)</i>
Sem restrição	0,087
Bocal redutor	0,055
Venturi	0,087

Pode-se observar que o bocal redutor proporciona uma vazão de ar máxima inferior a dos demais sistemas de alimentação. Esse comportamento se deve ao fato do bocal redutor criar uma resistência maior ao escoamento, como já esperado.

Esse fato leva também à obtenção de quedas de pressão superiores na configuração bocal redutor, pois gera uma pressão inicial no sistema maior e,

consequentemente, uma elevada perda de carga total. Essa particularidade pode ser verificada na Figura 4.1, que mostra os gradientes de pressão variando com a vazão de ar alimentada para as configurações avaliadas.

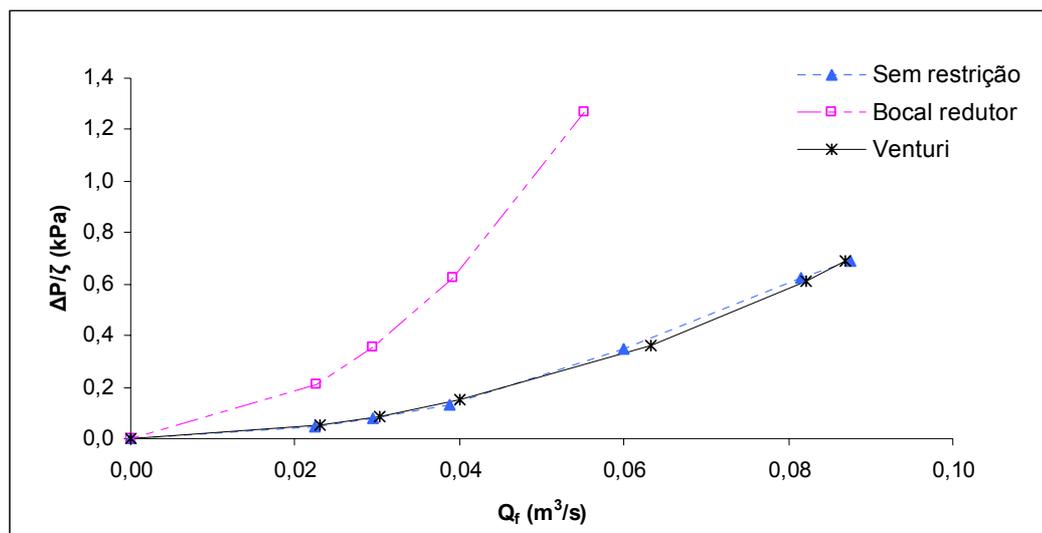


Figura 4.1: $\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para as três configurações de alimentação.

Nota-se como as variáveis já discutidas, queda de pressão e vazão de ar, são correlacionadas, mostrando como esperado que, quanto maior a vazão de ar, maior a queda de pressão gerada no 'loop' pneumático. Fica claro também a semelhança do comportamento do leito em relação a esses parâmetros quando ele opera com os alimentadores sem restrição e Venturi e a discrepância do comportamento quando o alimentador é o bocal redutor em relação às outras configurações.

A queda de pressão está associada a uma perda de energia do sistema que pode ser causada por diversos fatores. Neste caso essa dissipação energética ocorre principalmente devido ao atrito fluido-parede. Além disso, a presença de

singularidades, como a alimentação e a curva de 180° no transportador estudado, contribuem significativamente para o aumento de ΔP , pois estas criam turbulências no escoamento que, por sua vez, contribuem para essa perda de energia. A influência de cada trecho do sistema separadamente em relação à queda de pressão, para diferentes valores de vazão de ar alimentada pode ser verificada através da Figura 4.2.

A queda de pressão localizada que mais contribui para a perda de carga total, em todos os casos, é a provocada pela passagem do fluido pela região de alimentação, porque nesta há a ocorrência de perturbações no escoamento causadas pela redução da área de passagem do ar ou a abertura na parede da tubulação para a descarga de sólidos. Para as configurações sem restrição e Venturi a contribuição é de aproximadamente 70% da queda de pressão total gerada no sistema, enquanto que para o bocal redutor essa contribuição é superior a 90%, resultado este ainda proveniente da questão inicialmente discutida neste tópico, relacionada à elevada resistência provocada por este dispositivo.

Até aqui, é notável como a presença da constrição no bocal redutor influencia a fluidodinâmica do alimentador. No entanto, o mesmo princípio de restrição da área de escoamento é encontrado no Venturi. A diferença entre esses dispositivos está na forma como esta restrição acontece. Quando a tubulação pela qual um fluido escoar tem sua área reduzida, a passagem do fluido por essa constrição faz com que sua velocidade se altere, levando à formação da chamada '*vena contracta*' na região central da tubulação (Kavassaki, 1985).

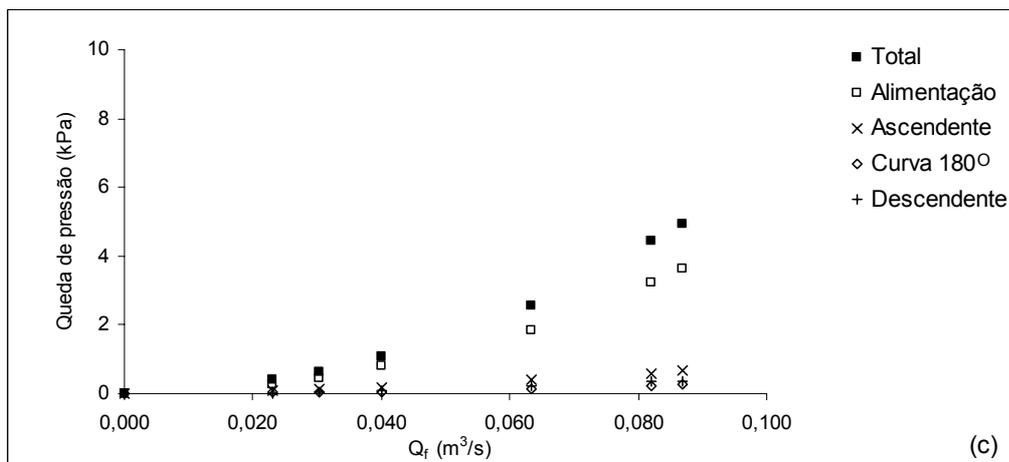
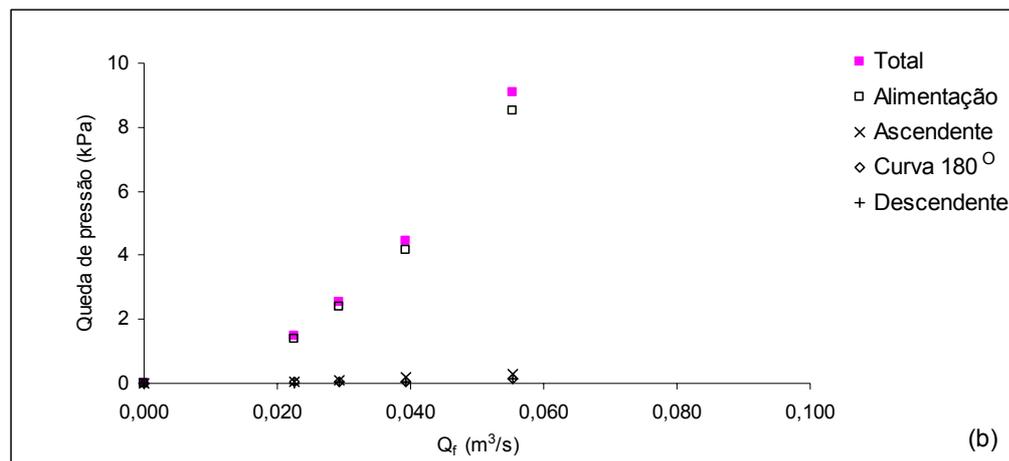
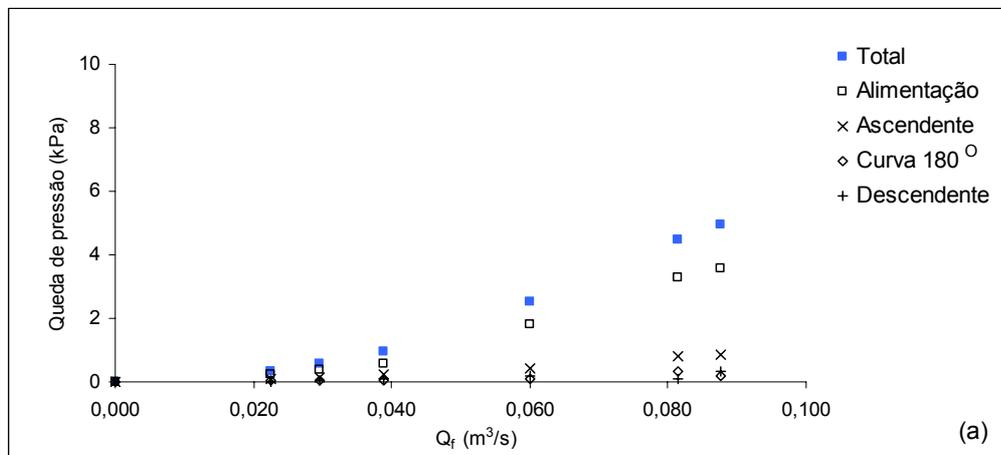


Figura 4.2: Perda de carga parcial e total em função da vazão volumétrica de ar. (a) Alimentador gravitacional sem restrição; (b) alimentador gravitacional com bocal redutor; (c) alimentador gravitacional com Venturi.

No bocal redutor, essa diminuição ocorre de forma brusca, levando à formação de uma ‘vena contracta’ mais turbulenta e gerando uma perda de carga irreversível. Já no Venturi, a redução e a recuperação da área de escoamento ocorrem de forma gradativa. Isso faz com que a ‘vena contracta’ formada seja suave e “bem comportada”, assim boa parte da pressão perdida durante a passagem na constrição é recuperada na saída do Venturi, produzindo uma perda de carga residual pequena, fato característico dos dispositivos Venturi.

A análise ainda da Figura 4.2 mostra que, apesar da curva não aumentar de forma expressiva a perda de carga, como no caso da alimentação, de qualquer forma ela está elevando o valor desse parâmetro. Por isso a literatura recomenda muita cautela na utilização de curvas em projetos de sistemas de transporte pneumático (Marcus *et al.*, 1990). Nos resultados encontrados para os três casos aqui apresentados, desconsiderando a região de alimentação, as curvas são responsáveis por um acréscimo, em média, de 20 % de perda de carga em relação à queda de pressão total, o que corresponde a contribuições bastante próximas às da região descendente do sistema, resultado bastante relevante, pois no escoamento descendente há um deslocamento considerável (2 m) e na curva, apenas uma mudança de direção.

A Figura 4.3 apresenta a pressão estática média ao longo do transportador para cada configuração de alimentação estudada. Os dados foram obtidos para uma condição operacional comum às três configurações ($Q_f = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$). Pode-se observar como a perda de pressão vai ocorrendo à medida que o ar escoar no sistema de transporte pneumático e as perturbações presentes no escoamento.

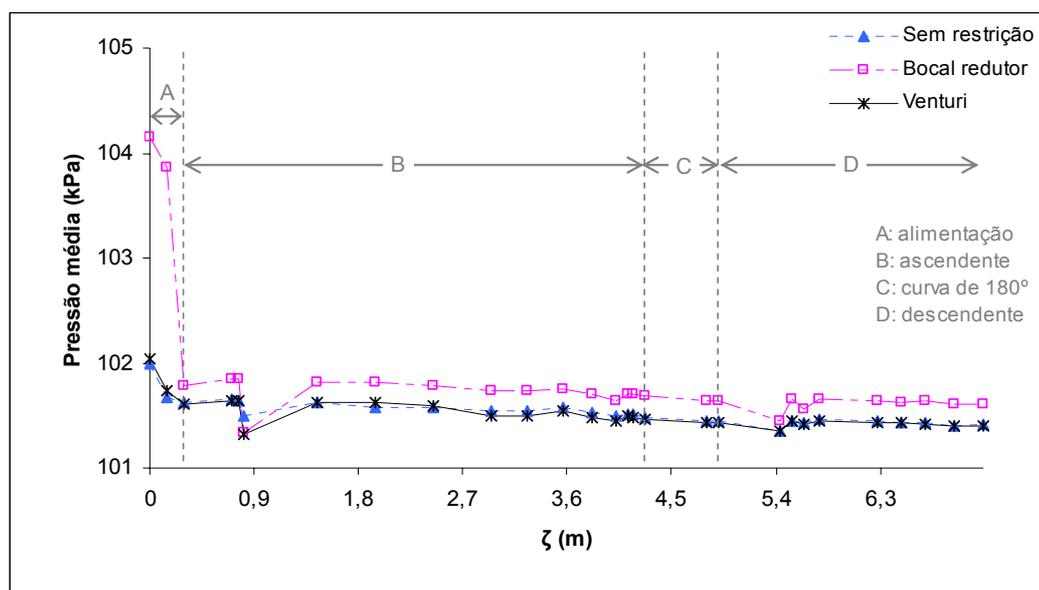


Figura 4.3 – Pressão estática média ao longo do leito para $Q_f = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ nas três configurações de alimentação.

Kavassaki (1985) afirmou que a presença de singularidades gera uma degradação irreversível de energia, pois estas criam forças que atrapalham o movimento do fluido proporcionando perturbações no escoamento. A perturbação causada, no entanto, não é localizada, estando presente ao mesmo tempo à montante e à jusante do local de formação. Essas perturbações são visualizadas na Figura 4.3 após a alimentação e nas proximidades da região onde ocorre a mudança de direção. Foi constatado inclusive que essas perturbações são maiores quanto maior a vazão de ar alimentada ao leito, conforme mostra a Figura 4.4. Assim, para a realização de uma comparação e análise detalhada das perturbações que ocorrem no sistema estudado, os perfis de pressão em cada trecho do transportador pneumático foram traçados para a condição de Q_f máximo de cada alimentador, para uma melhor visualização. Esses dados estão apresentados na Figura 4.5.

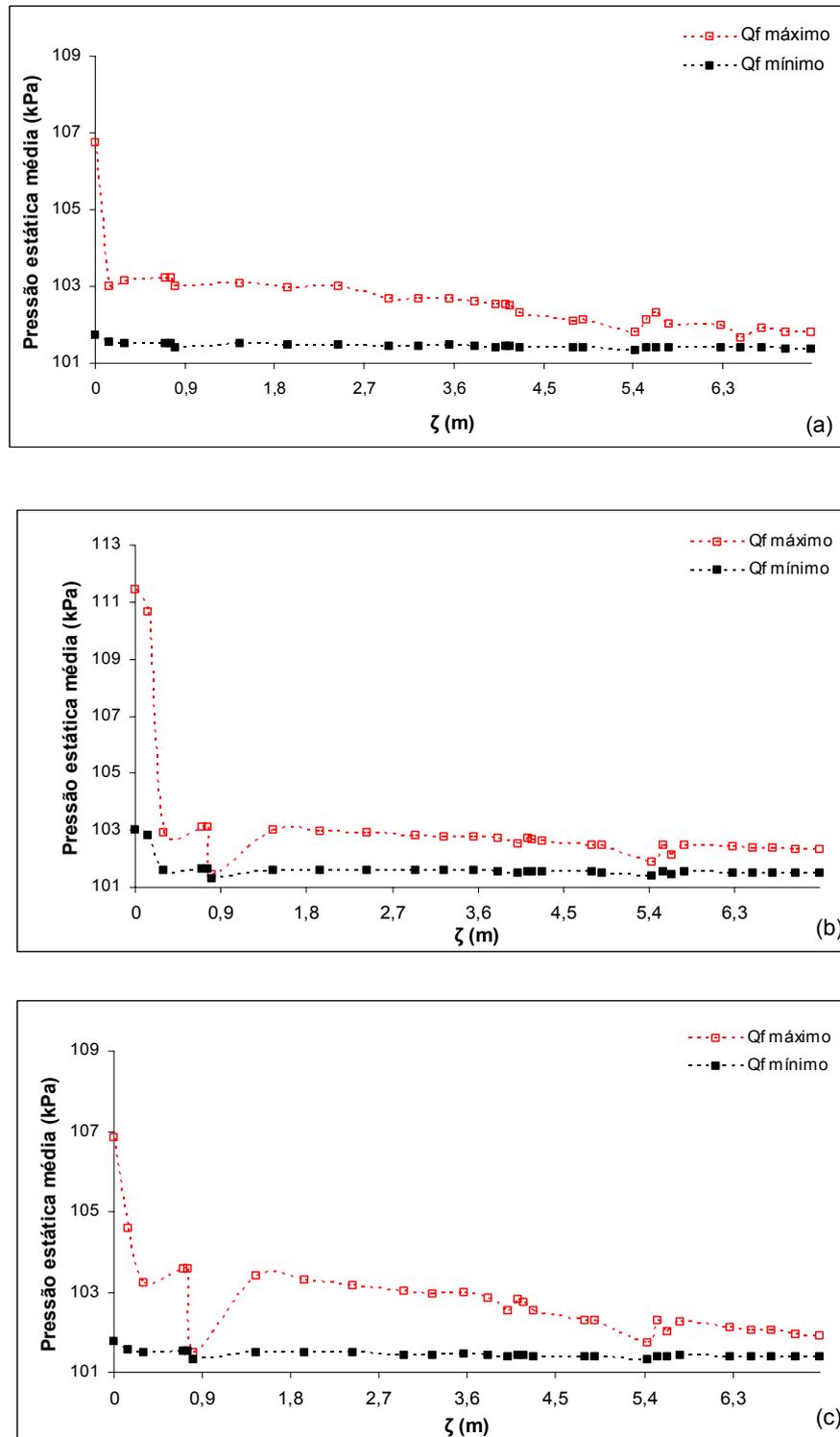


Figura 4.4: Pressão estática média ao longo do leito. (a) Alimentador gravitacional sem restrição; (b) alimentador gravitacional com bocal redutor; (c) alimentador gravitacional com Venturi.

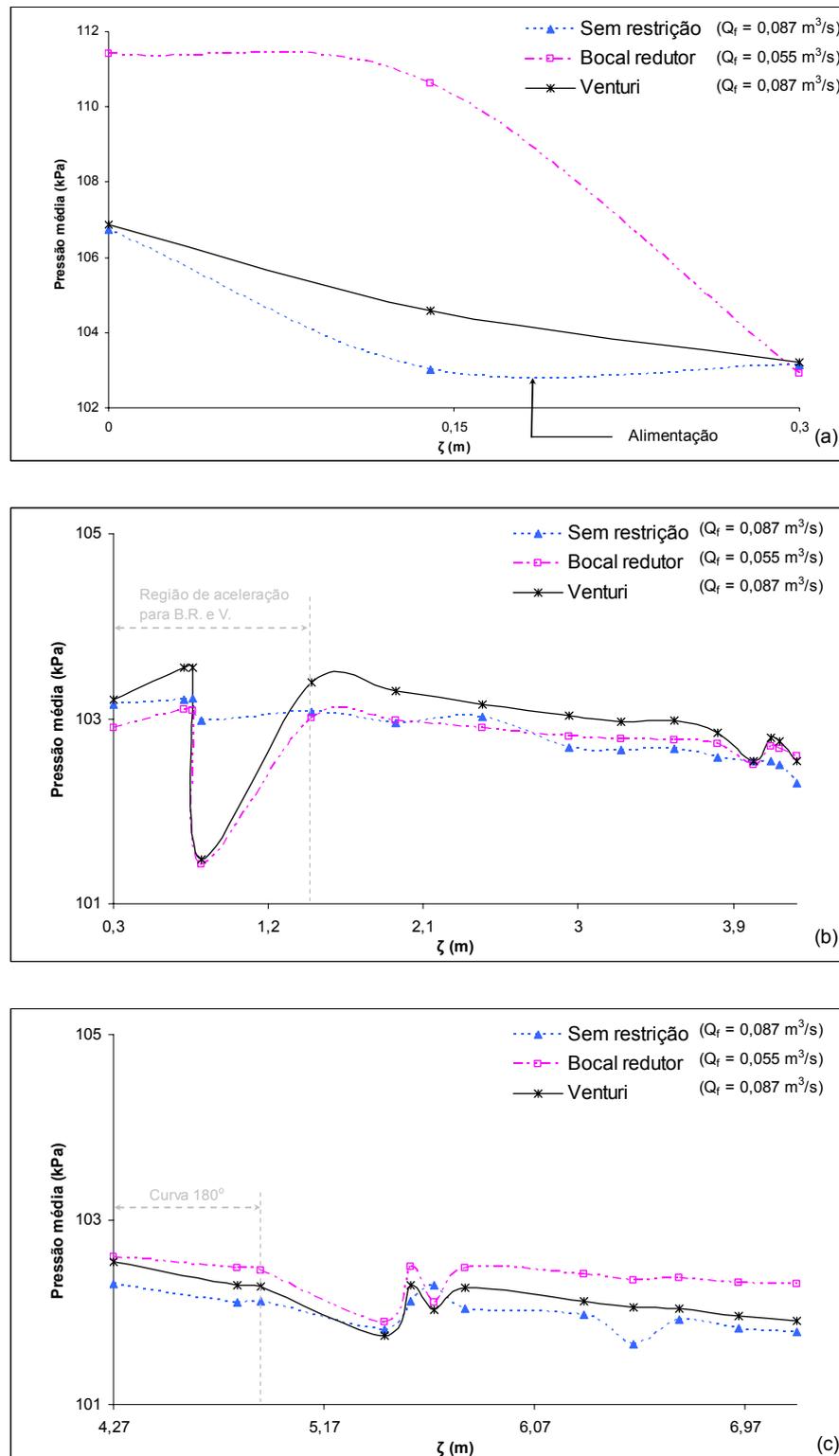


Figura 4.5: Pressão ao longo do leito para as configurações estudadas na condição de Q_f máximo. (a) Alimentação; (b) Trecho ascendente; (c) Curva 180° e trecho descendente.

Na região de alimentação (Figura 4.5a) têm-se comportamentos distintos para cada alimentador. A configuração gravitacional sem restrição e combinado com Venturi, tem patamares inicial e final de pressão muito próximos. Nestes, a presença do ponto de descarga dos sólidos provoca um distúrbio que tem início na região anterior ao ponto de alimentação. Porém, para o sem restrição a queda inicial é mais brusca e a seguir a pressão se estabiliza, já no Venturi, a pressão cai de forma mais suave e uniforme em todo o trecho. No caso do bocal redutor, a perturbação ocorre de fato quando o escoamento passa pela constrição, pois altera bruscamente a velocidade do gás, causando uma queda de pressão.

Posterior à alimentação, observa-se a propagação dos distúrbios para as três configurações (Figura 4.5b). A amplitude da perturbação é acentuada para o bocal redutor e o Venturi, como resultado da formação de '*vena contracta*', já referida. A perturbação provocada pela configuração sem restrição possui amplitude bem inferior comparada às dos casos já mencionados, pois nesta não há formação de '*vena contracta*'. Na Figura 4.5b a maior amplitude da perturbação causada pelo Venturi em relação à causada pelo bocal redutor é devido somente à vazão máxima no primeiro ser maior, e como já verificado (Figura 4.4), quanto maior Q_f maior a amplitude dos distúrbios causados.

Nesta região de transporte um parâmetro que também é afetado pelo tipo de alimentador utilizado é o comprimento da região de entrada necessário para a absorção da “desordem energética” causada pela presença do alimentador. O comprimento dessa região de aceleração em sistemas ar - partículas pode ser obtido experimentalmente identificando-se a região não linear na curva de P em função de ζ . O mesmo procedimento de identificação foi utilizado aqui para o

sistema isento de partículas, e apontou para as configurações bocal redutor e Venturi um comprimento de entrada de aproximadamente 1,15 m ($\zeta = 1,45$ m). Já para a configuração gravitacional sem restrição, essas perturbações se propagaram até a entrada da curva, ou seja, o sistema não absorve a perturbação causada pela alimentação, gerando instabilidades no escoamento em todo o trecho ascendente.

A curva de 180° provoca distúrbios no escoamento antes e depois da mudança de direção. As perturbações à montante (Figura 4.5b) para os casos com bocal redutor e Venturi, ocorrem no mesmo ponto, a uma distância de 0,46 m ($\zeta=3,81$ m) da entrada da curva, uma vez que até esta posição o perfil de pressão apresentou variação linear. Para o sem restrição não há como identificar exatamente o ponto onde o distúrbio causado pela curva aparece, por causa da não dissipação da perturbação causada pelo alimentador.

À jusante da curva (Figura 4.5c), a perturbação finda no mesmo ponto para os casos bocal e Venturi, a 0,87 m ($\zeta=5,77$ m) da saída de curva de 180°. Para a configuração sem restrição, esse limite encontra-se a 1,79 m ($\zeta=6,69$ m) da saída da curva. Nos resultados obtidos aqui, pode-se ver ainda que a amplitude dos distúrbios da região descendente para o alimentador sem restrição é maior que nas demais configurações. Essa diferença pode ser justificada por causa da não dissipação dos distúrbios da região ascendente e posterior sobreposição com as perturbações da região de mudança de direção, fazendo que essas influenciem no escoamento do trecho descendente do sistema de transporte pneumático. Diversos trabalhos da literatura limitam a interferência da configuração de alimentação à região de entrada do leito (Silva, 1997; Littman *et al.*, 1993; Osti, 2003). Para os alimentadores bocal e Venturi, de fato, a região de alimentação não mais

influencia no escoamento do trecho descendente, no entanto, quando é usado o alimentador sem restrição vê-se essa influência nesse trecho. Esse fato mostra que a fluidodinâmica de sistemas de transporte pneumático é muito peculiar de cada configuração de equipamento e a realização de afirmações generalizadas para esses tipos de sistemas não é aconselhável.

Para a determinação de comprimentos da região de aceleração a literatura apresenta diversos critérios quantitativos (Marcus *et al.*, 1990, Bovo e Ferreira, 2004). No entanto, as análises realizadas e comentadas foram todas efetuadas avaliando-se o comportamento linear ou não das curvas de forma visual, não tendo sido empregado nenhum método matemático.

Observa-se também que, neste estudo, a comparação dos alimentadores com restrição da área de escoamento ocorre de forma parcial, já que a influência da porcentagem de redução da área de escoamento não foi avaliada, pois elas são diferentes para cada caso (bocal: redução de 44%; Venturi: redução de 38%). A influência desse parâmetro precisa ser também avaliada, pois Osti (2003) verificou que esta característica num sistema de alimentação que utiliza o bocal redutor afeta o comportamento operacional do leito.

4.2 - Influência da presença das partículas

Quando as partículas sólidas são inseridas no leito pneumático, um fator até aqui não considerado passa a ser muito relevante: a estabilidade operacional com o tempo. Durante os ensaios, para todas as condições estudadas ficou claro que a utilização do alimentador gravitacional sem qualquer modificação, no sistema

estudado, é inviável, uma vez que este apresentou elevada instabilidade, sendo sua utilização não aconselhada.

Para os outros alimentadores, os limites do intervalo operacional da vazão de ar foram alterados. Para o escoamento de ar, a principal força oposta que precisa ser vencida é o atrito fluido-parede. Já para o escoamento bifásico, tem-se, além desta, o atrito partícula-parede e o peso das partículas transportadas, podendo ainda ocorrer o aparecimento de forças eletrostáticas. Esses fatores alteraram os limites inferiores, pois o ar alimentado tem que proporcionar uma força de arraste mínima superior à somatória das forças contrárias. Nesse estudo, como a alimentação ocorre no trecho ascendente, o peso das partículas contribui nesta somatória. Esses limites para o alimentador gravitacional combinado com bocal redutor e com Venturi podem ser observados na Figura 4.6, onde são mostrados os gradientes de pressão em função da vazão de ar no tubo de transporte.

Uma análise comparativa entre os alimentadores baseada na Figura 4.6, apresenta um comportamento similar para ambas as configurações, sendo as diferenças encontradas no intervalo operacional de vazão de ar alimentada pelo soprador e na vazão máxima de sólidos transportada. Mostra, inclusive, que a presença das partículas eleva os gradientes de pressão, sendo esse aumento maior no Venturi do que no bocal redutor. Nota-se também que, quanto maior a quantidade de partículas, maior a perda de carga do sistema, pois as contribuições causadas pelos atritos partícula-parede, partícula-fluido e partícula-partícula são aumentadas.

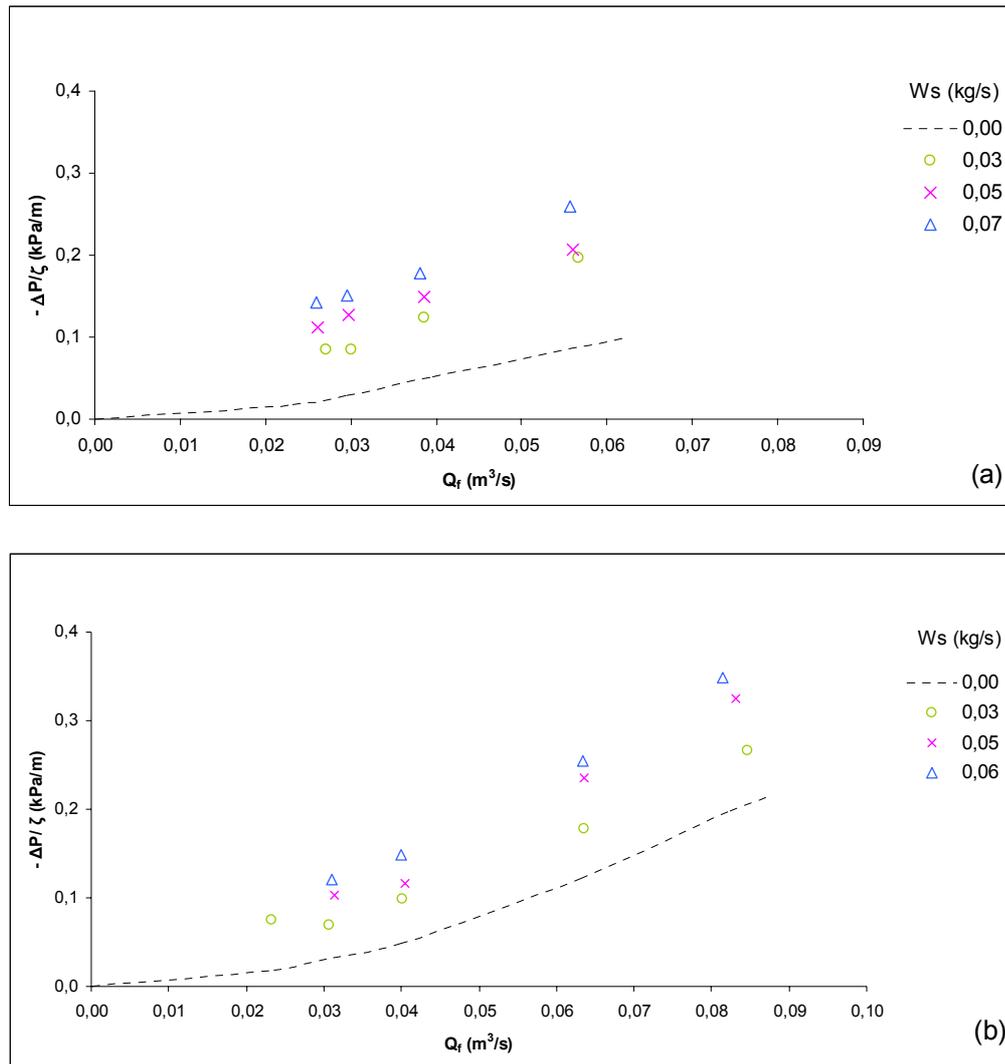


Figura 4.6: $\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para $d_p = 0,85$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.

A forma de construção dos gráficos da Figura 4.6 foi proposta por Rizk (1986) como método de identificação de regimes de escoamento em leitos pneumáticos, onde a queda de pressão considerada, como já dito anteriormente, é a partir do ponto de escoamento plenamente desenvolvido (para estes casos: $\zeta = 1,45$ m). Assim, segundo critérios do autor, para as configurações estudadas e em todas as condições operacionais consideradas neste trabalho foi obtido apenas transporte em regime diluído.

Entretanto, a metodologia de Rizk fornece apenas o modo de transporte do leito como um todo, não avaliando como a concentração de partículas se comporta ao longo do transportador, informação essa que pode ser extraída das medidas de flutuação da pressão em cada trecho do sistema considerado. A utilização dessas medidas para a verificação da concentração de partículas ao longo do leito foi proposta por Satija *et al.* (1984), através do emprego do cálculo do desvio padrão das mesmas, sendo que os autores concluíram que quanto maior o desvio padrão obtido, maior a concentração de partículas. Tomando essa conclusão de Satija *et al.* (1984) como postulado, será feito agora um estudo da concentração de partículas ao longo do leito em função de Q_f e W_s .

A Figura 4.7 apresenta os resultados do desvio padrão em função da posição no caso da utilização dos alimentadores bocal redutor e Venturi. Para o alimentador com bocal redutor, de fato o transporte das partículas em todas as condições operacionais avaliadas ocorrem apenas com baixo desvio padrão, logo, pelo postulado utilizado, com baixa concentração de partículas. Mesmo ao longo do leito a concentração de partículas não tem diferenças relevantes.

O mesmo já não é observado para a configuração com Venturi. Nessa configuração, a região imediatamente após a inserção de sólidos em todas as condições consideradas possui um alto desvio padrão e, por consequência, uma quantidade de partículas superior às dos demais trechos do leito que operam em regime de baixa concentração. Resultado similar é encontrado quando o leito opera com $W_s = 0,05$ kg/s também após a curva de 180° . Esses resultados são coerentes com a literatura, pois na região de entrada as partículas estão sendo aceleradas e na curva, sofrem mudança de direção. Nota-se também que o

aumento, tanto de Q_f quanto de W_s , eleva os valores do desvio padrão, ou seja, o modo de transporte caminha para uma condição de maiores concentrações.

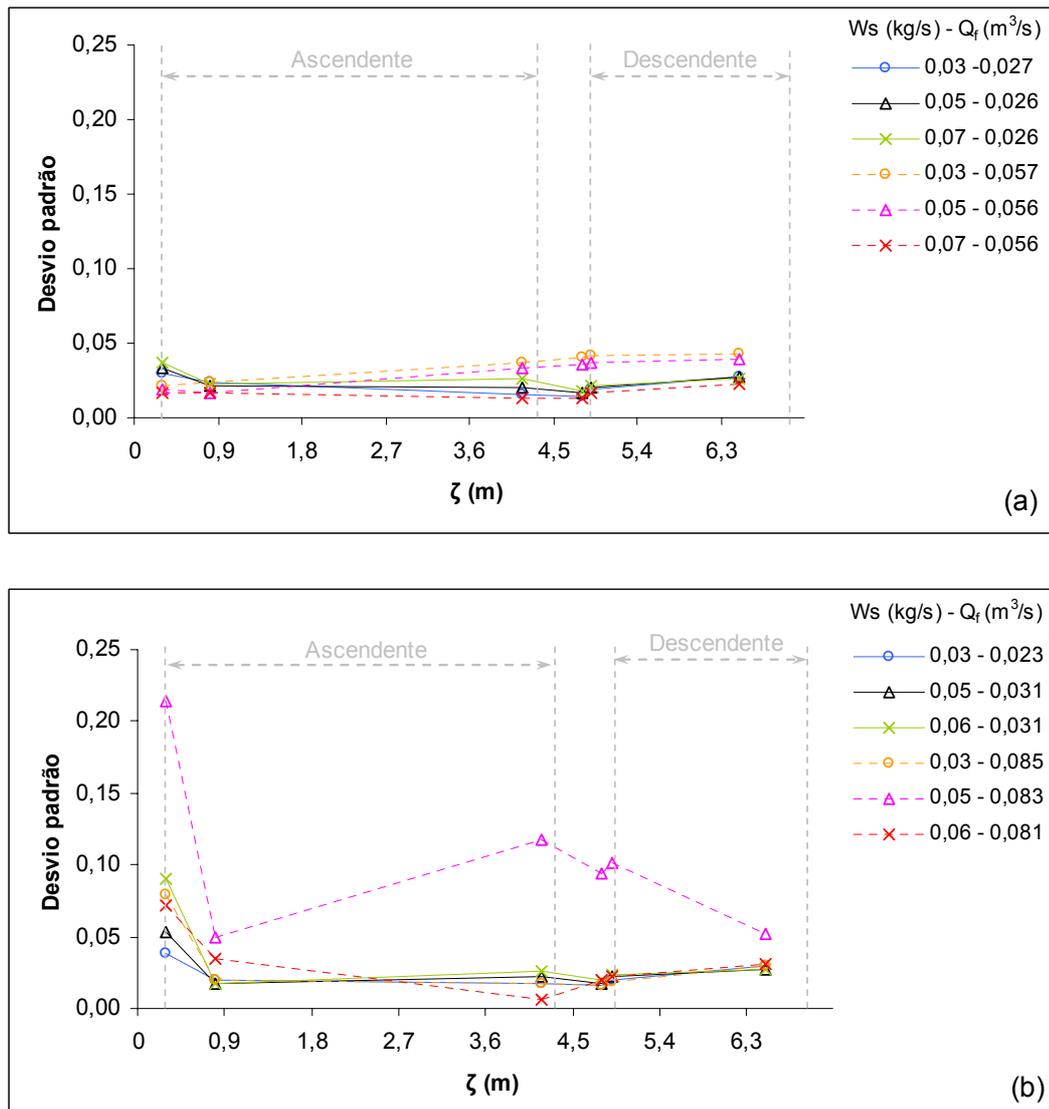


Figura 4.7 – Desvio padrão ao longo do leito para diferentes condições operacionais e $d_p = 0,85$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.

As quantidades máximas de sólidos obtidas para cada alimentador foram diferentes. Para o bocal redutor foi obtida uma condição com $W_{s \text{ máx}} = 0,07$ kg/s, enquanto no Venturi o valor máximo foi $W_{s \text{ máx}} = 0,06$ kg/s. Embora a diferença

não seja expressiva numericamente, qualitativamente ela aponta para uma eficiência superior do bocal redutor em relação ao Venturi na tarefa de transportar partículas com $dp = 0,85$ mm. Nesta tubulação de alimentação, quanto menor a resistência encontrada pelas partículas, maior a quantidade de sólidos possível de ser inserida no leito pneumático. No item 4.3 será visto que essa eficiência dos sistemas de alimentação é também influenciada pelo diâmetro de partícula.

Como já dito anteriormente, o gráfico de Rizk considera a queda de pressão a partir do ponto em que o leito tem seu escoamento plenamente desenvolvido. No entanto, vale ressaltar que no tópico anterior, foi referido que no alimentador combinado com bocal redutor, a maior parcela da queda de pressão provém da região de alimentação dos sólidos, região esta que não tem sua influência ponderada neste tipo de gráfico.

A importância de se considerar o leito como um todo na avaliação de queda de pressão pode ser observada na Figura 4.8, que apresenta a pressão ao longo da região de aceleração do transportador para os alimentadores estudados, numa condição operacional comum. Nesta figura pode-se observar a discrepância entre os valores iniciais de pressão entre as configurações, sendo que o alimentador com bocal redutor produz as maiores perdas de carga; comportamento análogo ao observado quando o leito operava isento de partículas.

Os distúrbios causados no escoamento de um fluido puro e de uma mistura bifásica no leito são apresentados na Figura 4.9. Nesta, pode-se observar, para as duas configurações de alimentação consideradas, que a presença de partículas no leito pneumático amplia as perturbações, especialmente as da região de aceleração no trecho ascendente. A literatura destaca a região de alimentação de um

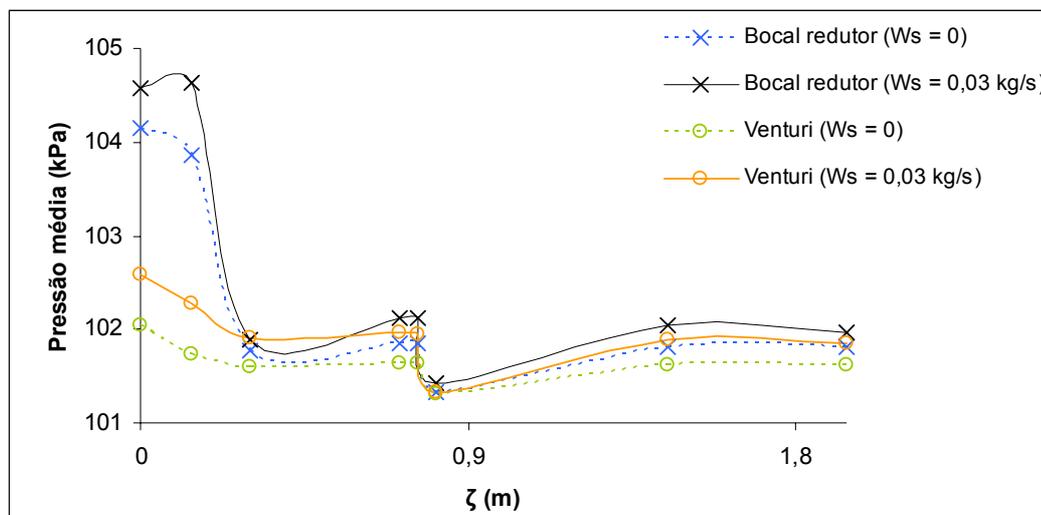


Figura 4.8 – Pressão média ao longo da região de aceleração do leito para $Q_f = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$; $W_s = 0$ e $0,03 \text{ kg/s}$, para as configurações de alimentação bocal redutor e venturi.

transportador pneumático como instável e com queda de pressão oscilante. Diversos autores justificam esta instabilidade pela brusca variação de quantidade de movimento causada pela introdução dos sólidos (Marcus *et al.*, 1990). Além disso, essas perturbações mais amplas contribuem para que nesse trecho se tenha a maior parcela da perda de carga. Nota-se ainda que, quanto maior W_s e Q_f , maiores foram os distúrbios no escoamento bifásico.

Dessa forma, pode-se notar até aqui que as perturbações na região de alimentação são provocadas pelo tipo de alimentador utilizado, e que a amplitude desses distúrbios é correlacionada com a presença das partículas e as condições operacionais de trabalho. Verifica-se ainda através da Figura 4.9 que o comprimento da região de aceleração, logo após o ponto de descarga de sólidos foi praticamente o mesmo para todas as condições utilizadas de W_s (de zero ao máximo). O que mudou foi a amplitude da perturbação da pressão. Assim nota-se

que para os dados representados na Figura 4.9 o comprimento da região de entrada depende somente da configuração do sistema de alimentação e não de W_s .

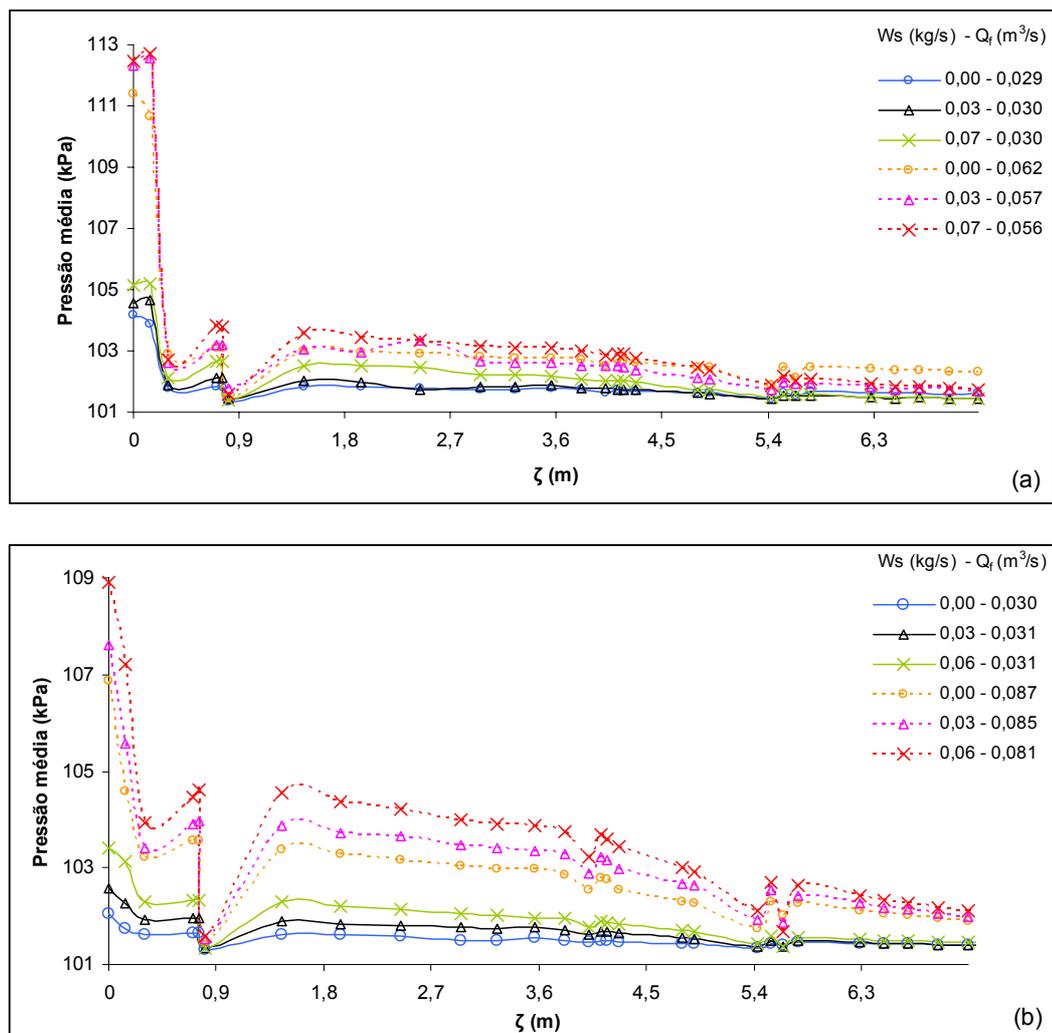


Figura 4.9: Pressão média ao longo do leito para $Q_f = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ e $d_p = 0,85 \text{ mm}$ para diferentes valores de W_s . (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com venturi.

4.3 - Influência do diâmetro de partícula

A Figura 4.10 apresenta os valores de gradientes de pressão em função da vazão de ar para as configurações de alimentação consideradas e operando com diferentes diâmetros de partículas.

O diâmetro das partículas fez com que uma mesma configuração do leito tivesse diferentes intervalos operacionais. Para o bocal redutor, o aumento de dp fez com que o intervalo de vazão de ar se estreitasse, e que a vazão máxima de sólidos aumentasse ($\approx 14\%$). No entanto, esse aumento de W_s não fez com que os patamares de pressão do sistema apresentassem alterações significativas ($< 10\%$). Para o Venturi, os resultados encontrados foram similares aos do bocal redutor. A diferença é que neste caso o aumento de W_s máximo foi mais expressivo ($\approx 180\%$). As causas para esse significativo aumento precisariam ser estudadas mais detalhadamente, para uma melhor compreensão do fenômeno.

A determinação do regime de escoamento pela metodologia de Rizk (1986) (Figura 4.10) leva à mesma conclusão obtida quando o leito operava com partículas de $dp = 0,85$ mm, ou seja, no leito ocorre o transporte apenas de forma diluída.

Igualmente à análise realizada para quando o leito operava com as partículas menores, considerando a metodologia proposta por Satija *et al.* (1984) através dos resultados de flutuação de pressão para $dp = 2,0$ mm é possível notar como a concentração de partículas se comporta ao longo do transporte. A Figura 4.11 apresenta o desvio padrão das medidas de flutuação de pressão em função do

comprimento do leito para diferentes condições operacionais dos alimentadores gravitacionais com bocal redutor e Venturi.

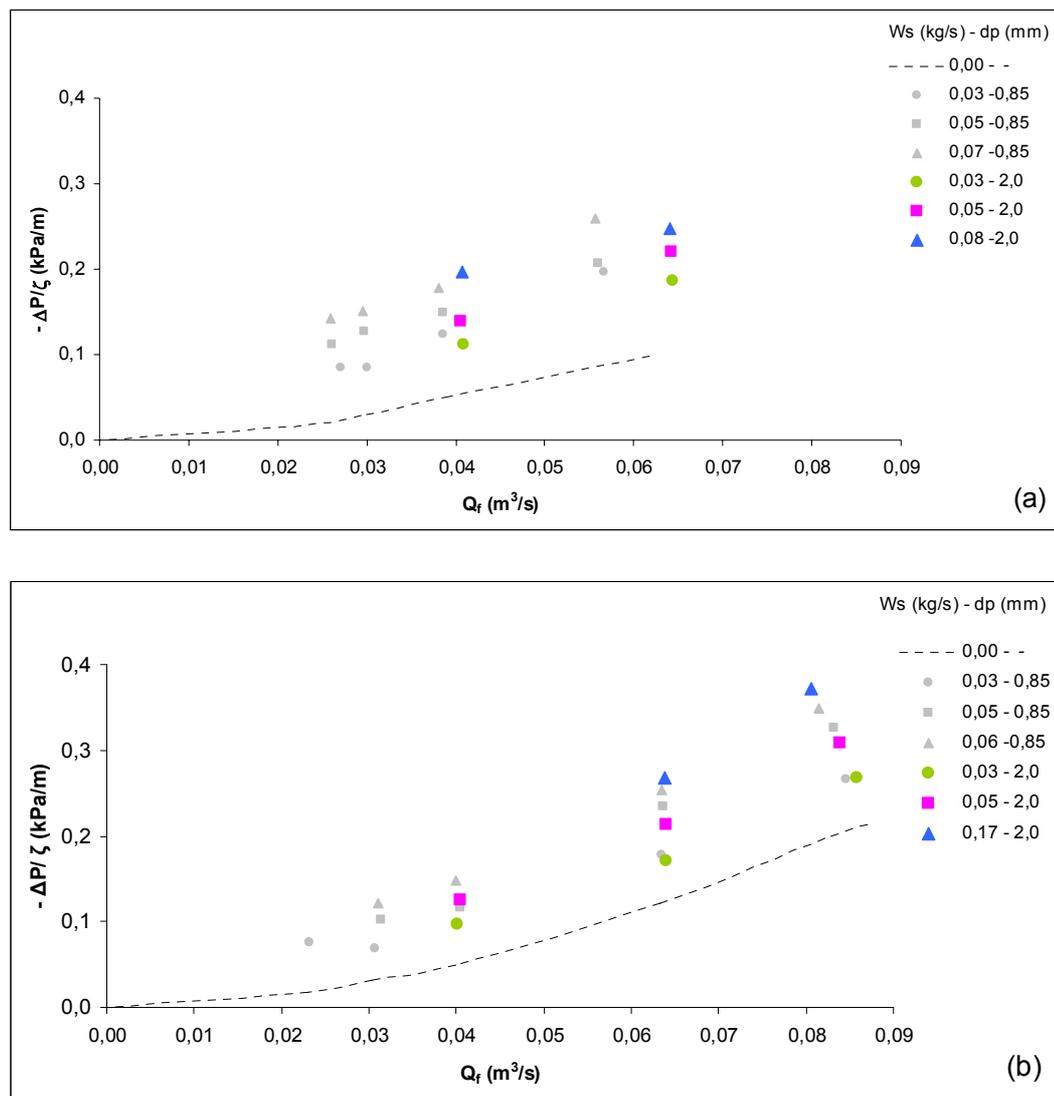


Figura 4.10: $\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para $d_p = 0,85$ mm e 2,0 mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.

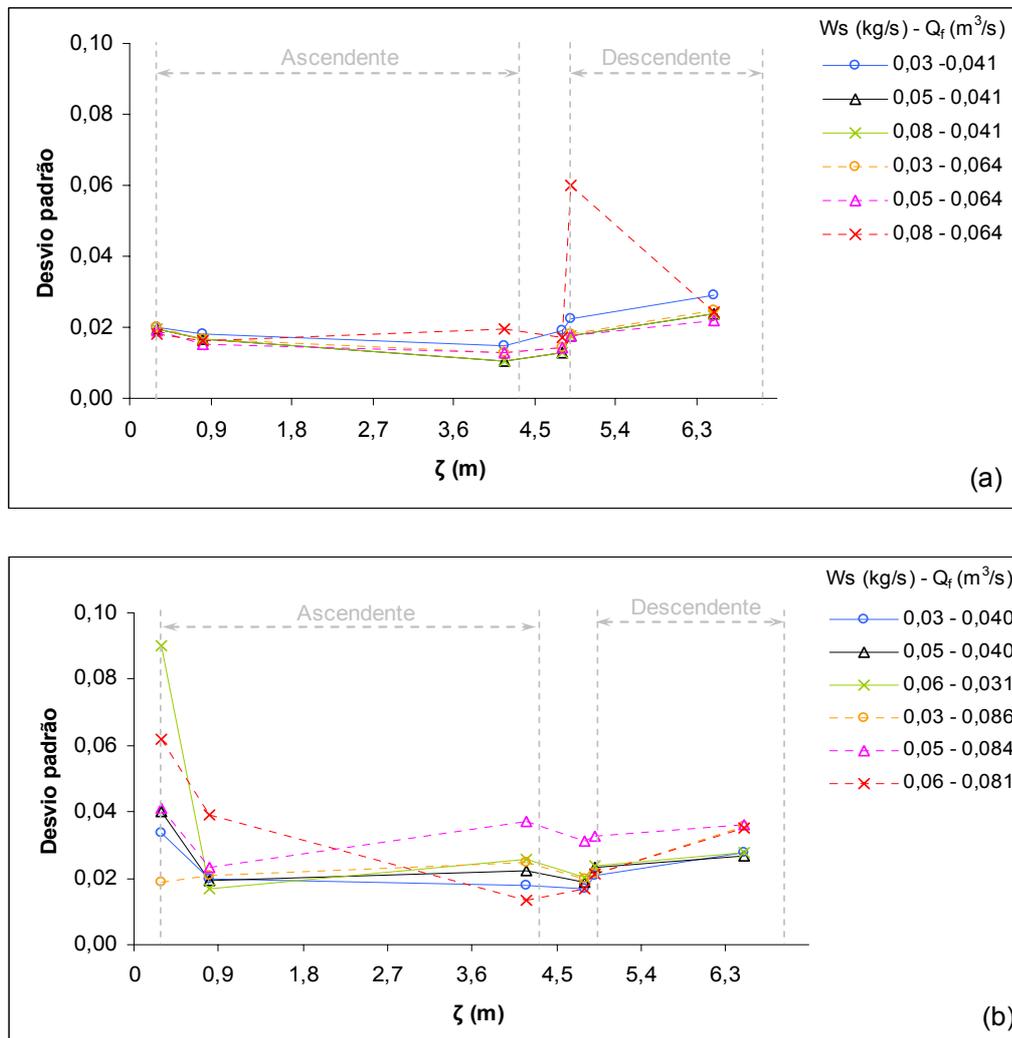


Figura 4.11 – Desvio padrão ao longo do leito para diferentes condições operacionais e $d_p = 2,0$ mm. (a) Alimentador gravitacional com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.

Para a configuração com bocal redutor, na maioria das condições operacionais estudadas, o escoamento ocorre a baixa concentração de partículas até a saída da curva de 180° . A partir daí a concentração de partículas sofre uma pequena elevação, devido à formação de um ‘roping’ mais expressivo na seção curva. Quando se tem as condições W_s e Q_f máximos, percebe-se claramente que o sistema sofre uma expressiva influência do ‘roping’ na saída da curva, sendo o responsável por este fenômeno a condição limite em que o leito operava. Para o

Venturi, nota-se que a concentração das partículas tem um caráter mais oscilante ao longo do leito, sendo que as maiores concentrações estão presentes após a região de alimentação e nas proximidades da região curva.

Por fim, em relação à influência de dp no perfil de pressão ao longo do transportador, pode-se ver que, apesar do aumento considerável em dp ($\approx 2,4$ vezes), os perfis de pressão ao longo do leito e a perda de carga sofrem pouca influência, como pode ser visto na Figura 4.12, que apresenta a pressão em função do comprimento do leito nas mesmas condições operacionais ($Q_f = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $W_s = 0,03 \text{ kg/s}$), para o leito operado com os alimentadores bocal redutor e Venturi e com partículas de $dp = 0,85$ e $2,0 \text{ mm}$.

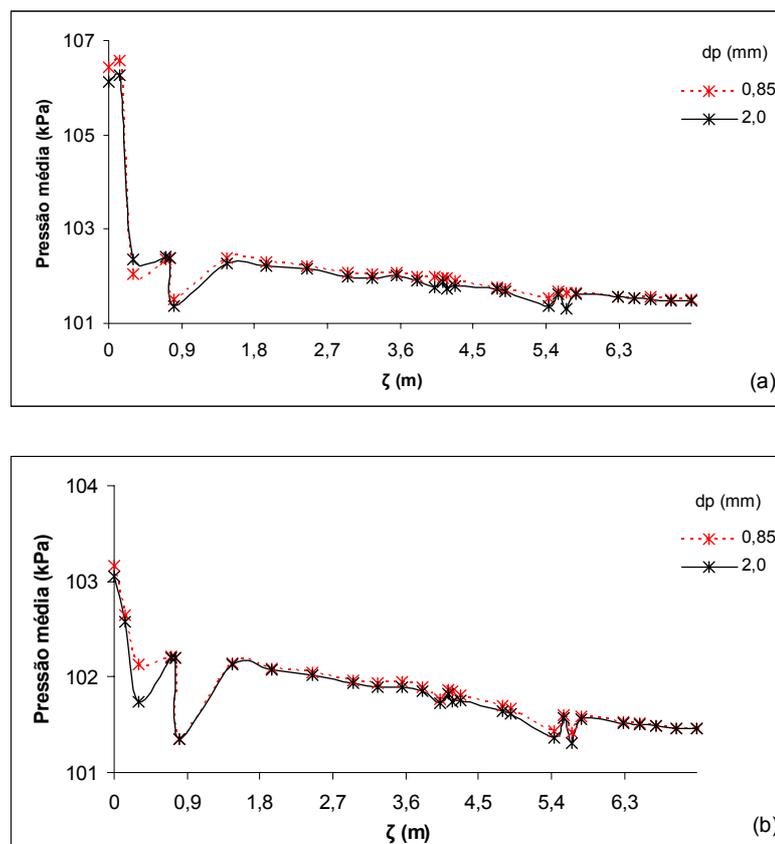


Figura 4.12: Pressão média ao longo do leito para $Q_f = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $W_s = 0,03 \text{ kg/s}$.
 (a) Alimentador gravitacional combinado com bocal redutor; (b) alimentador gravitacional combinado com Venturi.

4.4 – Análise do Venturi

Como já dito neste trabalho, as singularidades produzem uma queda de pressão inerente à passagem do fluido através delas. Constrições são singularidades que podem estar presentes ao longo de uma tubulação, seja para medida de vazão, aceleração de fluidos, etc. Nesse estudo específico, dois tipos de constrições foram avaliados na região de alimentação de sólidos num sistema de transporte pneumático, o bocal redutor e o Venturi, sendo que em ambos os casos o objetivo da presença da constrição era acelerar o ar que atravessava a região de alimentação a fim de que as partículas sólidas fossem inseridas no transportador com mais eficiência e estabilidade.

Nesses dispositivos uma variável importante é a redução da área de escoamento. No entanto, na grande maioria dos trabalhos, inclusive neste, essa variável é determinada de forma arbitrária, não sendo adotado nenhum critério científico na sua seleção. Todavia, sabe-se que a região de alimentação influi na fluidodinâmica do leito e que, dependendo das características do alimentador, diferentes resultados podem ser encontrados.

Osti (2003) realizou o estudo da redução de área de um bocal redutor na fluidodinâmica de um transportador pneumático vertical com alimentador tipo jorro, chegando a resultados que mostraram comportamentos distintos para cada configuração. A autora não avaliou a perda de carga do alimentador, apenas seus efeitos na linha.

Assim, baseado no exposto, o percentual de redução da área de escoamento de um Venturi foi analisado, sendo avaliada sua influência no

comportamento fluidodinâmico e seu efeito na perda de carga total do sistema. Dois percentuais de redução foram utilizados: um Venturi com diâmetro de “garganta” de 33 mm, que resulta num percentual de redução de 38%, já que a tubulação adjacente tem diâmetro de 53,4 mm, e um Venturi com diâmetro de “garganta” de 43 mm (redução de 19%). A Figura 4.13 apresenta os gradientes de pressão em função da vazão de ar alimentada.

Nesta figura, observa-se que quando o Venturi foi utilizado com as partículas de 2,0 mm, W_s máximo para o Venturi com 33 mm foi 2,4 vezes maior do que para o Venturi com 43 mm. Isso pode ser explicado, provavelmente, pela eficiência do Venturi de menor diâmetro de “garganta” em evitar escape de ar pelo tubo de alimentação de sólidos, fazendo com que as partículas encontrem uma menor resistência de escoamento por este tubo. Assim, a quantidade de partículas disponíveis para serem alimentadas ao leito é maior, o que leva a uma vazão máxima de sólidos elevada.

Nota-se ainda que o percentual de redução da área de escoamento não alterou o regime de transporte, continuando no modo diluído para todas as condições operacionais avaliadas. Os intervalos de vazão de ar também não sofreram alterações, sendo a diferença entre os intervalos dos gráficos (a) e (b) devido somente ao tamanho de partícula. Quanto à vazão de sólidos, quando o leito operou com partículas de 0,85 mm e com os Venturis com 33 mm e 43 mm, a vazão máxima de sólidos foi a mesma.

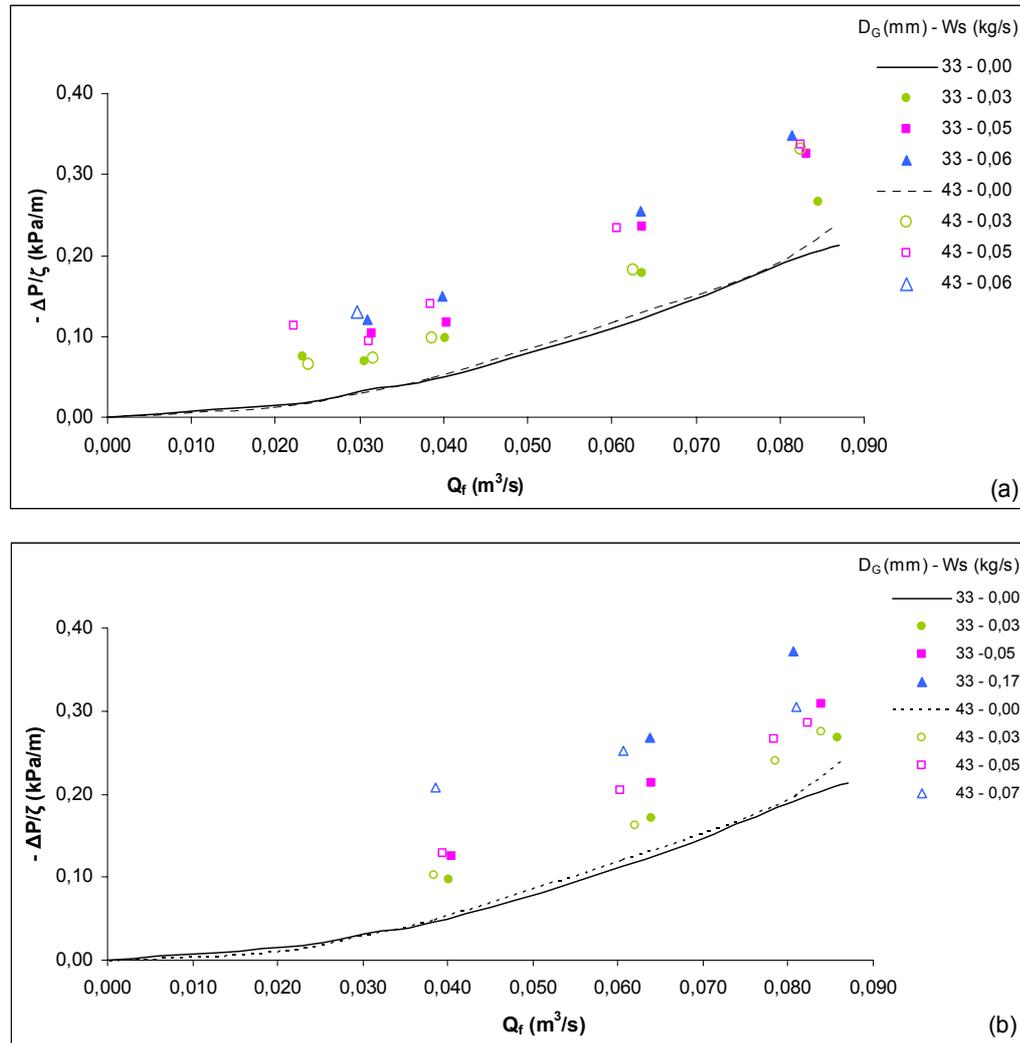


Figura 4.13: $\Delta P/\zeta$ em função de Q_f , para o alimentador gravitacional combinado com Venturi com $D_G = 33$ e 43 mm. (a) $0,85$ mm; (b) $2,0$ mm.

Porém, como já dito, o tipo de gráfico apresentado na Figura 4.13 não leva em conta a região de alimentação, pois considera a queda de pressão a partir do ponto de escoamento plenamente desenvolvido. Para uma avaliação dessa região a Figura 4.14 mostra o comportamento da queda de pressão ao longo do venturi, para operação com partículas de $0,85$ mm e $2,0$ mm.

Nesses gráficos vê-se que o comportamento da queda de pressão na região de inserção de sólidos é similar, sendo as perdas de cargas geradas parecidas,

tanto para partículas de 0,85 mm e para as de 2,0 mm, resultado coerente com o encontrado anteriormente.

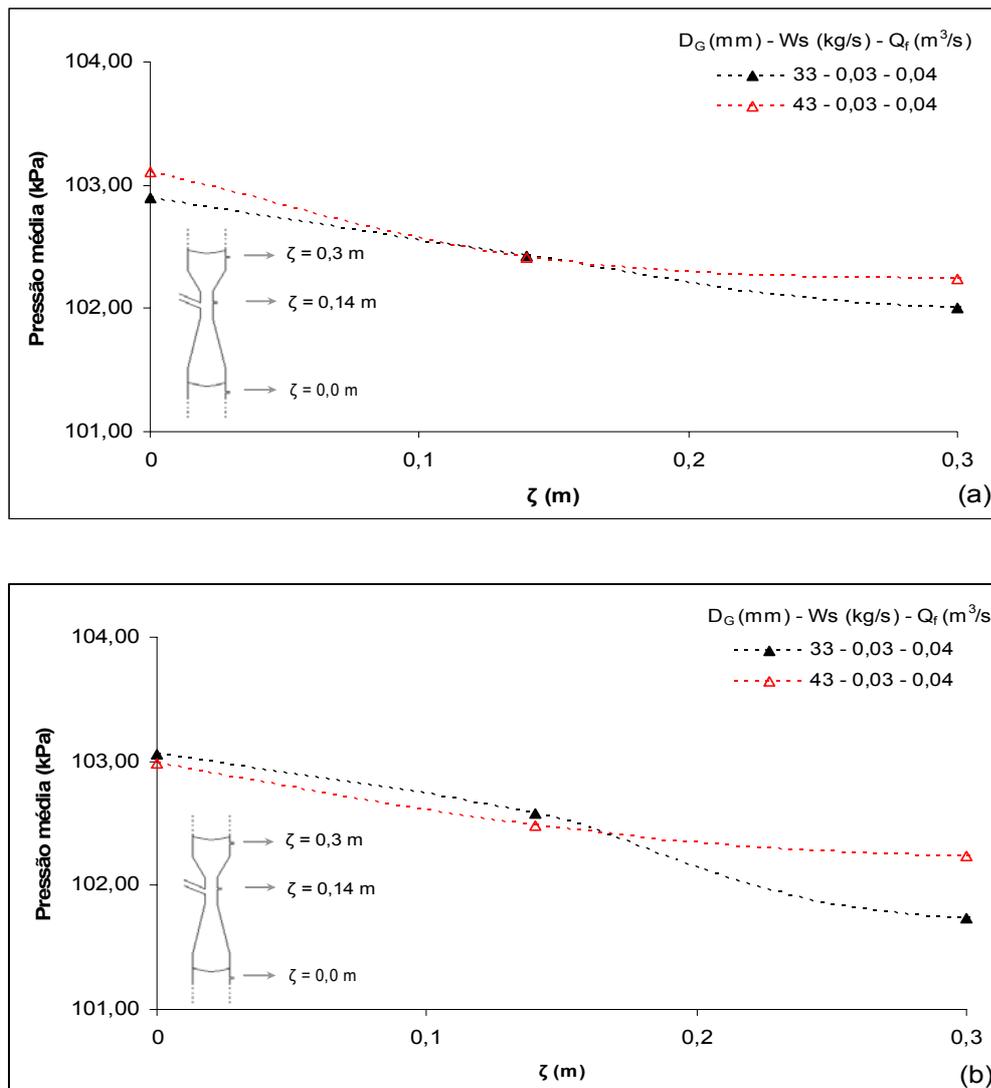


Figura 4.14: Pressão média ao longo do alimentador Venturi. (a) 0,85 mm; (b) 2,0 mm.

Apesar de na região de alimentação não ser perceptível a influência das características do alimentador na fluidodinâmica do leito, a análise do comportamento da pressão em toda a extensão do leito mostra que, de fato, o grau de redução, juntamente com o tamanho de partícula, exerce influência na

fluidodinâmica. Isso pode ser observado analisando o comportamento do leito operando com as diferentes partículas. Para $dp = 0,85$ mm, uma diminuição do grau de redução faz com que ΔP diminua também; enquanto que operando com $dp = 2,0$ mm, um comportamento inverso é encontrado. Esses resultados foram extraídos da análise da Figura 4.15, que apresenta a pressão média ao longo do leito.

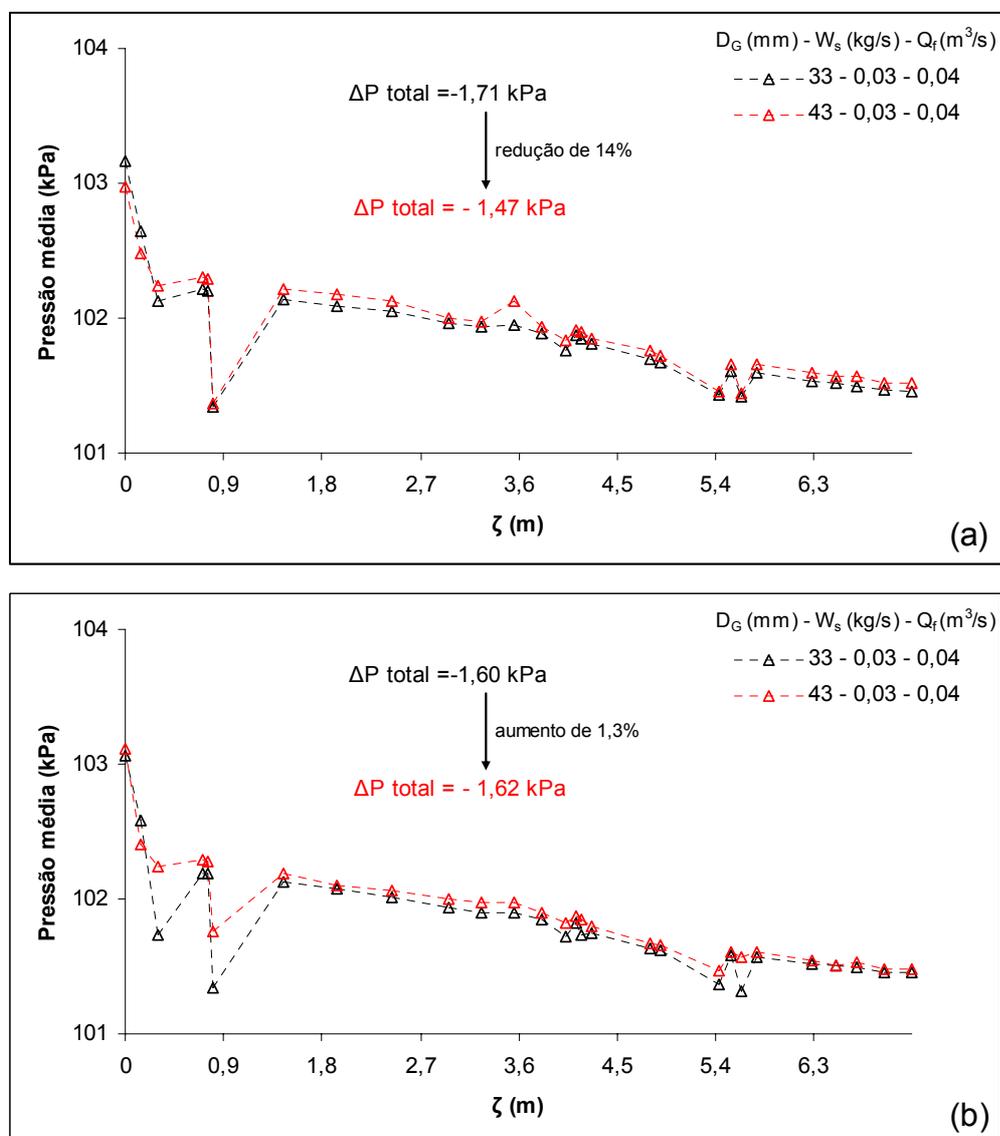


Figura 4.15: Pressão média ao longo do leito quando operado com alimentador venturi para $Q_f = 0,04$ m³/s e $W_s = 0,03$ kg/s. (a) 0,85 mm; (b) 2,0 mm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Através dos resultados obtidos neste estudo e da análise realizada no capítulo anterior, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- a fluidodinâmica de um sistema gás-sólido é, de fato, influenciada pela configuração de alimentação;
- em relação à queda de pressão no leito, a região de inserção de sólidos é a que mais contribuiu para as condições investigadas, variando entre 70 e 90%. A curva de 180° teve contribuições próximas a da região de deslocamento descendente;
- o escoamento apresentou perturbações devido às singularidades do sistema (entrada e curva de 180°) e a amplitude dessas está relacionada com as condições operacionais (Q_f) e a presença das partículas;
- as condições de operação de um sistema de transporte pneumático foram influenciadas pelo tipo de alimentador, pela presença das partículas e seu diâmetro;

- não foram observadas influências significativas do diâmetro da partícula na fluidodinâmica do alimentador e do leito;
- em relação ao diâmetro de “garganta” no alimentador tipo Venturi, foi observado a influência desta variável na fluidodinâmica do leito pelas análises realizadas; e
- as modificações na região de descarga de sólidos de um alimentador gravitacional num sistema de transporte pneumático mostraram-se favoráveis, pois permitiram uma operação do sistema de forma estável.

Inicialmente, acreditava-se que, ao final deste trabalho, entre os alimentadores estudados, encontrar-se-ia um mais promissor para a aplicação em processos de transporte gás-sólido. De fato, apenas o alimentador gravitacional tem seu uso desaconselhado, devido à sua instabilidade operacional. Em relação aos demais alimentadores, abrangendo inclusive o alimentador gravitacional com Venturi com diâmetro de “garganta” de 43 mm, a utilização de cada configuração é muito particular de cada sistema de transporte pneumático. Assim, a escolha do sistema de alimentação para um determinado leito deve ser realizada com cautela, porque cada alimentador tem características bem distintas, e em projetos, a busca de uma combinação entre diversos fatores é trabalhosa, porém, fundamental para que se tenha um sistema com operação satisfatória e viável.

É aconselhado que mais estudos na mesma linha de pesquisa deste trabalho sejam realizados, tanto na utilização de outros tipos de alimentadores, bem como na avaliação do comportamento das configurações aqui consideradas com sólidos de diferentes densidades, formatos etc.

Em relação ao Venturi, uma análise detalhada do comportamento fluidodinâmico deste alimentador contribuiria favoravelmente para a otimização, não apenas da alimentação em leitos pneumáticos, mas também em outros tipos de sistemas que utilizam esse dispositivo.

A aplicação de transportadores pneumáticos é muito vasta. Através de análise fundamental, sabe-se também que a quantidade de fenômenos que coexistem neste tipo de sistema é grande. Assim, a realização de estudos abordando diversos aspectos, indo além da estabilidade operacional e da queda de pressão, é fundamental para o completo conhecimento e domínio desses tipos de sistemas.

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. 91p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 1997.

ARASTOPOUR, H. Pneumatic transport of solids. In: CHEREMISINOFF, N. P. **Encyclopedia of Fluid Mechanics**. Texas: Gulf Publishing Company, 1986.

BAEYENS, J.; VAN GAUWBERGEN, D.; VINCKIER, I. Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in design procedure. Powder Technology, v. 83, p. 139-148, 1995.

BOVO, T. F.; FERREIRA, M. C. Uma análise da metodologia baseada em medidas de perfis de pressão para a determinação do comprimento de entrada no escoamento gás-sólidos em tubos. In: COBEQ, xv, 2004.

CAPES, C. E.; NAKAMURA, K. Vertical pneumatic conveying: an experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes. Canadian Journal of Chemical Engineering, v.51, p. 31-38, 1973.

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. Canadian Journal of Chemical Engineering, v.82, p. 48-59, 2004.

DZIDO, G.; PALICA, M.; RACZEK, J. Investigations of the acceleration region in the vertical pneumatic conveying. Powder Technology, v. 127, p. 99-106, 2002.

FELTRAN, M. B. Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro. 68p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 2005.

FERREIRA, M. C. Desenvolvimento de um secador leito pneumático com reciclo de sólidos e com alimentador tipo jorro. 169p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 1991.

FERREIRA, M. C. Desenvolvimento de um leito pneumático com alimentador tipo jorro. 194p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 1996.

Referências Bibliográficas

FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M.; FERREIRA, M. C. Transporte pneumático vertical. São Carlos: Departamento de Engenharia Química, 1993. 89p. Apostila.

GELDART, D. Types of gas fluidization. Powder Technology, v. 7, p. 285-292, 1973.

HUFENUSSLER, M.; BRUNELLO, G. Secagem de farinha de mandioca em secador em leito piloto de transporte pneumático. In: Congresso Latino-Americano de Transferência de Calor e Matéria, 2º, 1986. p. 1577-1583.

HUILIN, L. *et al.* Numerical study of gas-solid flow in a precalciner using kinetic theory of granular flow. Chemical Engineering Journal, v. 102, p. 151-160, 2004.

ITO, H. Pressure losses in smooth pipe bends. Journal Basic Engineering, 123p. 1960.

JENIKE, A. W. **Gravity flow of bulk solids**. Salt Lake City: Utah Engineering Experiment Station, 1961.

JITSCHIN, W. Gas flow measurement by the thin orifice and the classical Venturi tube. Vacuum, v. 76, p. 89-100, 2004.

KALMAN, H. Attrition of powders and granules at various bends during pneumatic conveying. Powder Technology, v. 112, p. 244-250, 2000.

KAVASSAKI, Y. Desenvolvimento de técnicas de medidas de baixas pressões diferenciais aplicadas à determinação de perdas de carga localizada em conexões com redução. Dissertação de mestrado –USP, São Carlos, 1985.

LEUNG, L.S. The ups and downs of gas-solid flow : a review. In: GRACE, J. R.; MATSEN, J. M. **Fluidization**. New York: Plenum Press, 1980. p. 25-68.

LITTMAN, H. *et al.* Modeling and measurement of effective drag coefficient in decelerating and non-accelerating turbulent gas-solid dilute phase flow of large particles in a vertical transport pipe. Powder Technology, v. 77, p. 267-283, 1993.

MARCUS, R. D. *et al.* **Pneumatic conveying of solids**. Londres: Chapman and Hall, 1990. 575 p.

NARIMATSU, C.P. Transporte pneumático vertical em fases densa e diluída – influência da densidade e do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico. 86p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 2000.

NARIMATSU, C.P. e FERREIRA, M. C. Vertical pneumatic conveying in dilute and dense phase: experimental study of the influence of particle density and diameter on fluid dynamic behavior. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.18, nº. 3, p 221-232, 2001.

Referências Bibliográficas

NEBRA, S. A. Secagem pneumática de bagaço de cana. 121p. Dissertação de mestrado - UNICAMP, Campinas, 1985.

OSTI, D. Z. Comportamento operacional de um sistema de alimentação de sólidos tipo jorro em um tubo de transporte pneumático com diferentes configurações de entrada. São Carlos: Departamento de Engenharia Química, 2003. 50p. Trabalho de Graduação.

PÉCORA, A. A. B. Estudo experimental do escoamento gás-sólido em fase diluída com transferência de calor e massa. 151p. Dissertação de mestrado - UNICAMP, Campinas, 1985.

PATROCÍNIO, A. B. Contribuições ao estudo do escoamento gás-sólido na presença de curvas. 297p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 2005.

PERRY, R. H. Chemical Engineers' Handbook, 7. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1999.

REH, L. The circulating fluid bed reactor – its main features and applications. Journal Zum , v. 20, p. 117-127, 1986.

RIZK, F. Principles of pneumatic conveying In: CHEREMISINOFF, N. P. **Encyclopedia of Fluid Mechanics**. Texas: Gulf Publishing Company, 1986. p. 311-348.

SATIJA, S.; YOUNG, J. B.; FAN, L. J. Pressure fluctuations and choking criterion for vertical pneumatic conveying of fine particles. Powder Technology, v. 43, p. 257-271, 1985.

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.

SILVA, E. M. V. Desenvolvimento e análise fluidodinâmica de um sistema de transporte pneumático vertical com alimentadores tipo jorro e parafuso rosca sem fim. 144p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Química, UFSCar, São Carlos, 1997.

VERGHESE, T.M.; NEDDERMAN R.M. The discharge of fine sands from conical hoppers. Chemical Engineering Science, v. 50, p. 3143-3153, 1995.

WANG, C. *et al.* Pneumatic transport of granular materials through a 90° bend. Chemical Engineering Science, v. 59, p. 4637-4651, 2004.

YANG, W. C. A correlation for solid friction factors in vertical pneumatic conveying line. AIChE Journal , v. 24, p..548-552, 1978.

Referências Bibliográficas

YANG, W. C.; KEAIRNS, D. Studies on the solid circulation rate and gas bypassing in spouted fluid-bed with a draft tube. Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 61, p. 349-355, 1983.

ZHANG, H.; ZHU, J. X. Hydrodynamics in down flow fluidized beds (2): particle velocity and flux profiles. Chemical Engineering Science, v. 55, p. 5461-5470, 2000.