

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM ALIMENTADOR DE SÓLIDOS
TIPO VÁLVULA-L DE PEQUENO DIÂMETRO**

Marina de Barros Feltran

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria do Carmo Ferreira

São Carlos – SP
2005

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM ALIMENTADOR DE SÓLIDOS
TIPO VÁLVULA-L DE PEQUENO DIÂMETRO**

Marina de Barros Feltran

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 de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria do Carmo Ferreira

São Carlos – SP
2005

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

F328ed

Feltran, Marina de Barros.

Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro / Marina de Barros Feltran. -- São Carlos : UFSCar, 2005.

73 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Transporte por tubo pneumático. 2. Válvula-L. 3. Alimentador de sólidos I. Título.

CDD: 621.51 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **MARINA DE BARROS FELTRAN**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 29 DE JULHO DE 2005.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a Maria do Carmo Ferreira
(Orientadora, PPG-EQ/UFSCar)

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

Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana
(FEQ/UNICAMP)

Blackbird singing in the dead of night
Take these broken wings and learn to fly
All your life
You were only waiting for this moment to arise.

Blackbird
(Lennon/McCartney)

Aos meus pais, Waldemar e
Tianinha, por todo amor e
dedicação que recebi, primordiais
no caminho que trilhei até agora.

AGRADECIMENTOS

Ao longo do desenvolvimento dessa dissertação, várias pessoas foram importantes para essa realização. Agradeço profundamente a:

- meus pais Waldemar e Tianinha, pelo amor, carinho, apoio, repreensões e tudo mais;
- meus irmãos, Rodrigo e Murilo, em quem sempre me espelhei para seguir em frente e minha cunhada, Ana Paula, a quem amo como irmã, pelos conselhos e conversas;
- meu namorado, amigo e companheiro de trabalho, Antônio Carlos, por estar comigo em todos os momentos, sejam eles quais forem;
- minha orientadora, Maria do Carmo, pelos ensinamentos, pela paciência e pela oportunidade que me ofereceu;
- professores do Centro de Secagem: Freire, Ana Maria, Dermeval e Ronaldo por toda assistência oferecida e presteza;
- colegas do Centro de Secagem: Alexandra, Alexei, André, Conceição, Fabíola, Leonardo, Luanda, Manoel, Marcelo, Marcos, Roger e Rodrigo pela amizade e ajuda prestada;
- irmãos Teodomiro e Donizeti Luchesi pela confecção do equipamento e aos técnicos Oscar, Valter e Edilson por atender prontamente todas as necessidades para realização dos experimentos;
- meus amigos de sempre: Vanessa, Larissa, Danilo B2, Marcel, Leandro, Gabi, Dani e muitos outros por estarem presentes na minha vida, cada um à sua maneira, sempre dispostos a me ouvir e às ex-colegas de república:

Alê, Cássia (juntamente com o agregado Zé), Gabi e Mônica pelos momentos felizes que passamos;

- Deq/UFSCar e ao Centro de Secagem por ceder as instalações e à Capes pelo auxílio financeiro;
- mentores espirituais e, sempre, a Deus.

RESUMO

Uma alimentação de sólidos controlada e uniforme em equipamentos de processo é essencial para o bom desempenho da operação, já que diferentes condições de trabalho podem ser obtidas dependendo da geometria e da dimensão do sistema de alimentação. Nesse trabalho, foi estudado um sistema de alimentação de sólidos com o objetivo de caracterizá-lo e analisar seu desempenho. O alimentador em questão é uma válvula do tipo não-mecânico conhecida como válvula-L.

Os aparatos experimentais utilizados para o estudo são uma válvula-L de acrílico de 23 mm de diâmetro interno e um transportador pneumático vertical construído em aço-inox com um tubo de 23 mm de diâmetro interno e 1,90 m de comprimento. O equipamento possui ao todo 18 tomadas de pressão distribuídas ao longo do mesmo, placas de orifício para as medidas de vazão de ar e de vazão de aeração e uma caixa de amostragem para vazão de sólidos. No transporte de sólidos são utilizadas esferas de vidro de diâmetros médios que variam de 260 μm a 1 mm. As medidas obtidas de vazão de sólidos, vazão do ar e perfil de pressão axial permitiram a caracterização do alimentador de sólidos e seu desempenho na operação de transporte.

Os ensaios realizados com a válvula-L operando isoladamente mostraram padrões de escoamento diferentes dependendo da faixa de vazão de sólidos obtida e também indicaram que o diâmetro de partícula influencia a vazão mínima de aeração requerida para o transporte. Os ensaios com a válvula-L operando na linha de transporte pneumático mostraram que as tendências de vazão de sólidos e de perda de carga na válvula se mantêm iguais às obtidas nos ensaios de caracterização da válvula-L. A operação com válvula de pequeno diâmetro se mostrou mais eficiente para partículas de menor diâmetro.

ABSTRACT

A controlled and uniform solids feeding in process equipment is important for a good performance operation, and distinct work conditions may be obtained depending on the feeding systems characteristics. In this work, a solids feeding system was studied aiming to have its performance characterized and analyzed. The solids feeder is a non-mechanical valve known as L-valve.

The experimental apparatus used in this study is composed by an acrylic L-valve with a 23 mm inner diameter and a vertical pneumatic conveying line, made of stainless steel with 23 mm inner diameter and 1,90 m length. The equipment have altogether 18 pressure taps distributed along of it, two orifice-plate flow meters to measure the air flow rates and the aeration flow rates, and a sample collector to measure the solids flow rates. In this work were used glass spheres with average diameters ranging from 260 μm to 1 mm. The measurements of solids flow rates, air flow rates, and pressure profiles allowed the solids feeder characterization and the analysis of its performance in conveying operation.

The runs accomplished with the L-valve operating isolatedly showed different flow patterns depending on aeration flow rate range and indicated that the particle diameter influences the minimum aeration flow rate required to conveying. The runs with L-valve operating in pneumatic conveying line showed the same tendencies of solids flow rates and pressure drops in L-valve that those obtained in L-valve characterization runs. The operation with 23 mm diameter inner L-valve was more efficient for smaller diameter particles.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
SUMÁRIO	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
NOMENCLATURA	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Sistema de Alimentação de Sólidos.....	4
2.2. Considerações sobre Transporte Pneumático	18
2.2.1. Região de Aceleração.....	22
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Materiais	25
3.2. Equipamento	25
3.3. Sistemas de Medida	29
3.3.1. Vazões de Ar e Aeração.....	29
3.3.2. Vazão de Sólidos.....	32
3.3.3. Perfil de Pressão.....	32
3.3.4. Estimativa da Porosidade Média.....	33
3.4. Procedimento Experimental	34
3.4.1. Operação da Válvula-L	34
3.4.2. Operação da Válvula-L na Linha de Transporte Pneumático	35
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	37

4.1. Caracterização da Válvula-L	37
4.1.1. Ensaios Preliminares	37
4.1.2. Padrões de Escoamento.....	41
4.1.3. Fluxos Mássicos de Sólidos	42
4.1.4. Diferenças de Pressão na Válvula-L	50
4.2. Operação da Válvula-L na Linha de Transporte Pneumático.....	53
4.2.1. Análise do Desempenho da Válvula-L	53
4.2.2. Balanço de Pressão no Sistema.....	57
4.2.3. Caracterização Fluidodinâmica do Transporte Pneumático..	61
4.2.4. Comparação entre o Desempenho da Válvula-L isolada e na Linha de Transporte Pneumático	65
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Válvulas não-mecânicas: (a) válvula-L; (b) válvula-J; (c) válvula-V (Klinzing et al., 1997)	5
Figura 2.2 Comportamento dos sólidos através da válvula-L a diferentes vazões de sólidos	6
Figura 2.3 Comportamento da válvula em relação ao escoamento dos sólidos para diferentes localizações de entrada de aeração	8
Figura 2.4 Balanço de pressão ao longo do sistema de recirculação	9
Figura 2.5 Representação esquemática do equipamento de Geldart e Jones (1991)	10
Figura 2.6 Diagrama geral de queda de pressão no leito pneumático em função da velocidade do gás (Marcus et al. 1990)	20
Figura 2.7 Curva característica para determinação experimental do comprimento da região de aceleração (Narimatsu, 2000)	23
Figura 3.1 Tubo de transporte pneumático vertical com alimentador tipo válvula-L (medidas em cm)	27
Figura 3.2 Esquema do aparato experimental: (1) tubo de transporte, (2) válvula-L, (3) reservatório de sólidos, (4) caixa de amostragem, (5) manômetros de água, (6) tomadas de pressão, (7) ciclone	29
Figura 3.3 Sistema de amostragem de sólidos	32
Figura 3.4 Esquema do aparato experimental para a caracterização da válvula-L	35
Figura 4.1 Vazões de sólidos em função da vazão de aeração para os três diâmetros médios de partícula (réplicas e trélicas)	39
Figura 4.2 Diferença de pressão na válvula-L em função da vazão de sólidos para os três diâmetros de partículas (réplicas e trélicas)	40
Figura 4.3 G_s/D_t em função de U_{aer}/U_{mf} para os três diâmetros de partículas estudados	43
Figura 4.4 G_s/D_t para três configurações diferentes do aparato experimental	45
Figura 4.5 Representação o escoamento de altas vazões de sólidos	46

Figura 4.6 Relação entre as velocidades na válvula-L e desviada para o tubo de descida, para partículas de diâmetro de 470 μm	48
Figura 4.7 G_s/D_t em função de $U_{\text{aer}}/U_{\text{mf}}$ para os três diâmetros de partículas estudados e comparação com correlações da literatura.....	49
Figura 4.8 Diferenças de pressão na válvula-L por unidade de comprimento em função do fluxo mássico de sólidos para os três diâmetros de partículas	51
Figura 4.9 Diferenças de pressão na válvula-L por unidade de comprimento em função do fluxo mássico de sólidos para partículas de 1,00 mm de diâmetro comparadas com correlações da literatura	52
Figura 4.10 Vazão de sólidos em função da vazão de aeração, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm . $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	54
Figura 4.11 Diferença de pressão em função da vazão de sólidos, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm . $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	55
Figura 4.12 Vazão de sólidos versus vazão de ar para as partículas de 470 μm ...	56
Figura 4.13 Representação do balanço de pressão e seus pontos-chave no equipamento	57
Figura 4.14 Balanços de pressão estática para algumas vazões de sólidos e para os dois diâmetros de partícula	58
Figura 4.15 Balanços de pressão estática comparando a influência dos dois diâmetros de partícula	60
Figura 4.16 Balanços de pressão estática para duas vazões de sólidos diferentes. $Q_{\text{aer}} = 8,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	61
Figura 4.17 Perfis de pressão no leito pneumático para os dois diâmetros de partículas	62
Figura 4.18 Gradientes de pressão no leito pneumático em função da vazão de sólidos para os dois diâmetros de partícula. $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	64
Figura 4.19 Porosidade no leito pneumático em função da vazão de sólidos para os dois diâmetros de partícula. $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	65
Figura 4.20 Vazão de sólidos em função da vazão de aeração, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm , nas duas condições. $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	66
Figura 4.21 Diferença de pressão em função da vazão de sólidos, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm , nas duas condições. $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Correlações de Geldart e Jones (1991) para previsão de G_s e ΔP_{VL}	12
Tabela 2.2 Correlações para previsão de G_s e ΔP_{VL} de Smolders e Baeyens (1995)	13
Tabela 2.3 Correlações para determinação da abertura da válvula	17
Tabela 3.1 Velocidades de mínima fluidização	25
Tabela 3.2 Equações de calibração para as placas de orifício da linha de ar comprimido e suas respectivas validades de operação.....	30
Tabela 3.3 Limites de operação para as condições utilizadas neste trabalho.....	36
Tabela 4.1 Condições experimentais para os ensaios preliminares	37
Tabela 4.2 Padrões de escoamento e suas faixas operacionais	41
Tabela 4.3 Condições experimentais para os ensaios de caracterização da válvula	42
Tabela 4.4 Condições experimentais para os ensaios do sistema de transporte....	53
Tabela 4.5 Diferenças de pressão para o leito de transporte e para a válvula-L para diversas vazões de sólidos e para os dois diâmetros de partícula.....	59

NOMENCLATURA

A_0	Área de abertura da válvula, L^2
c	Constante da equação de Forchheimer, adimensional
C_{des}	Coefficiente de descarga da abertura de uma válvula, adimensional
d_p	Diâmetro da partícula, L
D_t	Diâmetro do tubo, L
F	Força de atrito, $ML^{-2}T^{-2}$
g	Aceleração da gravidade, LT^{-2}
G_s	Fluxo mássico de sólidos, $ML^{-2}T^{-1}$
L	Comprimento, L
L_a	Distância entre a tomada de aeração e a linha central do tubo horizontal da válvula-L, L
L_{ra}	Comprimento da região de aceleração, L
P	Pressão, $ML^{-1}T^{-2}$
Q	Vazão volumétrica, L^3T^{-1}
Q_t	Vazão volumétrica total na válvula-L, L^3T^{-1}
Re	Número de Reynolds, adimensional
U	Velocidade superficial do fluido, LT^{-1}
u	Velocidade intersticial do fluido, LT^{-1}
U_t	Velocidade terminal da partícula, LT^{-1}
V	Velocidade superficial da partícula, LT^{-1}
v	Velocidade absoluta dos sólidos, LT^{-1}
W	Vazão mássica, MT^{-1}
$W_{s,máx}$	Vazão mássica máxima de sólidos, MT^{-1}

Símbolos gregos

β	Meio-ângulo da secção cônica do reservatório, adimensional
β'	Fator de forma, adimensional
Δh	Diferença de altura mostrada pelos manômetros, L
ΔP	Diferença de pressão, $ML^{-1}T^{-2}$
ε	Porosidade, adimensional
ϕ	Esfericidade, adimensional
κ	Permeabilidade do leito, L^2
μ	Viscosidade do ar, $ML^{-1}T^{-1}$
ρ	Densidade, ML^{-3}
ρ_L	Densidade do leito descendente, ML^{-3}

Sub-índices

aer	Aeração
Ar	Ar principal
DC	Tubo de descida
F	Fluido
H	Componente horizontal da válvula-L
mf	Mínima fluidização
LT	Tubo de transporte pneumático
P	Partícula
res	Reservatório de sólidos
S	Sólidos
SR	Secção da tubulação de reciclo
VL	Válvula-L

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Em equipamentos de processo na indústria química que operam com sistemas gás-sólidos, como transportadores pneumáticos, reatores, aquecedores, secadores, entre outros, a alimentação de sólidos é uma etapa crítica no processo como um todo e que merece uma atenção especial. Considerando a variabilidade das características dos materiais alimentados, que podem escoar facilmente, ou serem aderentes, terem granulometria uniforme, serem heterogêneos, ou ainda abrasivos, essa operação pode representar um problema industrial de difícil resolução no sentido de oferecer vazões constantes de sólidos (Gomide, 1983). Uma alimentação que permita um bom controle de vazões, com uma distribuição uniforme e regular dos sólidos durante a operação são essenciais para um bom desempenho dos equipamentos envolvidos no processo. Diferentes condições de escoamento podem ser obtidas modificando-se a geometria e as dimensões do sistema de alimentação, podendo-se obter um regime estável e bem comportado ou condições instáveis, em que se observam flutuações de pressão e oscilações na vazão que podem chegar a inviabilizar a operação. Por isso, os fatores que irão determinar a escolha do alimentador de sólidos a ser usado em cada operação serão as características dos sólidos como: densidade, abrasividade, tendência a aglomeração, entre outros, além das características do sistema em operação e das condições por este exigidas.

Existem diversos tipos de sistemas de alimentação. Uma das classificações dos alimentadores na indústria os divide entre os volumétricos, que oferecem vazões volumétricas de sólidos constantes e os gravimétricos, que oferecem

vazões mássicas constantes (Gomide, 1983). Os alimentadores também podem ser classificados em função da dependência da vazão de sólidos em relação à vazão de ar (Costa, 2001). Nesta classificação, os alimentadores podem ser separados em duas categorias principais: os independentes da vazão de ar (parafuso helicoidal, válvula rotativa, alimentador vibratório, válvula gaveta, correia, etc) e os dependentes da vazão de ar (válvulas tipo “L” ou “J”, alimentador tipo jorro, alimentador tipo Venturi, entre outros). Os primeiros são atuados mecanicamente e possuem a característica de proporcionar um escoamento de sólidos independente da vazão de gás, porém têm como limitação apresentar problemas de travamento e desgaste das suas partes mecânicas, já que possuem partes mecânicas móveis. Já os demais apresentam poucos problemas de desgaste, já que não possuem partes mecânicas móveis, entretanto a vazão de sólidos por eles fornecida é dependente da vazão de gás alimentada e, na maioria dos casos, operam através da inserção de uma aeração complementar, o que pode dificultar o estudo do seu comportamento fluidodinâmico.

Mais especificamente, a alimentação de sólidos em equipamentos de transporte pneumático merece uma atenção especial. Sistemas de transporte pneumático são equipamentos cujo desempenho depende fortemente do sistema de alimentação já que, além de apresentarem uma região de aceleração característica, são altamente sensíveis à ocorrência de instabilidades. Dessa forma, a análise das características fluidodinâmicas do escoamento em tubos de transporte pneumático pode fornecer bons subsídios para complementar a caracterização e verificação da viabilidade de um sistema de alimentação.

Considerando o tema exposto, o objetivo desse trabalho é estudar e caracterizar o desempenho de uma válvula de atuação não-mecânica como alimentador, a válvula-L, e analisar seu desempenho em um tubo de transporte pneumático. O alimentador tipo válvula-L foi escolhido como tema de estudo porque, apesar de já ser bem explorado na literatura, principalmente pela sua aplicação em Leitos Fluidizados Circulantes, a literatura indica que válvulas de pequenas dimensões, com diâmetros internos menores que 25 mm apresentam um comportamento peculiar, com características específicas, e ainda são poucos os estudos publicados com válvulas dessas dimensões. O uso deste alimentador em um sistema de transporte pneumático com tubulação de diâmetro de 23 mm foi investigado como forma de verificar sua viabilidade operacional em uma linha típica.

Para a realização do estudo, foram variadas condições operacionais como: vazão de ar fornecido, tamanhos de partículas e vazão de aeração da válvula-L, a fim de se caracterizar as faixas de operação e suas condições de estabilidade.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentadas uma revisão e análise dos trabalhos publicados referentes aos temas tratados no presente estudo, que incluem observações sobre sistemas alimentadores de sólidos, descrição e caracterização do sistema de alimentação específico (válvula-L) e algumas considerações gerais sobre o transporte pneumático.

2.1. Sistema de Alimentação de Sólidos

A alimentação de sólidos merece uma atenção especial no projeto de transportadores pneumáticos. Nos chamados alimentadores convencionais (do tipo independente), a vazão de sólidos independe da vazão de ar. Porém, estes podem apresentar problemas de degradação das partículas alimentadas, além de serem mais suscetíveis a problemas de emperramento e desgaste das partes mecânicas. Os alimentadores não-convencionais, do tipo dependente, possuem a vantagem de aceitarem o transporte de quase todo tipo de partícula, oferecendo a possibilidade de operação em uma ampla faixa de vazões de gás e serem menos sujeitos a problemas de desgastes. Entretanto, o fato da vazão de sólidos ser dependente da vazão de ar, nestes tipos de alimentadores, torna o estudo de seu comportamento um pouco mais complicado. Isto porque com dois parâmetros variando simultaneamente, não é possível isolar o efeito de cada um sobre uma determinada força ou característica fluidodinâmica.

Dentre os tipos de alimentadores não-convencionais, estão inseridas as válvulas de acionamento não-mecânicas, que são equipamentos que não possuem partes móveis e sendo, portanto, menos expostas a desgastes e bastante baratas em

relação aos outros métodos de alimentação. Requerem uma pequena quantidade de gás de aeração que é responsável pelo escoamento dos sólidos através da válvula e pelo controle de sua vazão. Para que o escoamento dos sólidos cesse, a aeração deve ser nula ou muito baixa, podendo-se dizer que a válvula estará fechada. Dentre as válvulas não mecânicas podem ser citadas as do tipo L, J, V e o selo reverso. Os parâmetros operacionais para uma válvula não-mecânica incluem o comprimento e diâmetro da tubulação formadora da válvula, tamanho e densidade da partícula e localização da entrada da aeração. A Figura 2.1 apresenta as três válvulas não-mecânicas mais comuns: válvula-L, válvula-J e válvula-V. Segundo Klinzing et al. (1997), as válvula-L e válvula-J apresentam um comportamento próximo no que diz respeito à perda de carga, já que esta será uma função monotônica do escoamento dos sólidos através da válvula em questão e, além disso, só existirá uma única relação entre as vazões de sólidos e de ar. A válvula-V, por sua vez, se diferencia das demais por poder operar em uma faixa maior de vazões e ter maior proteção contra o escoamento reverso de sólidos e de ar.

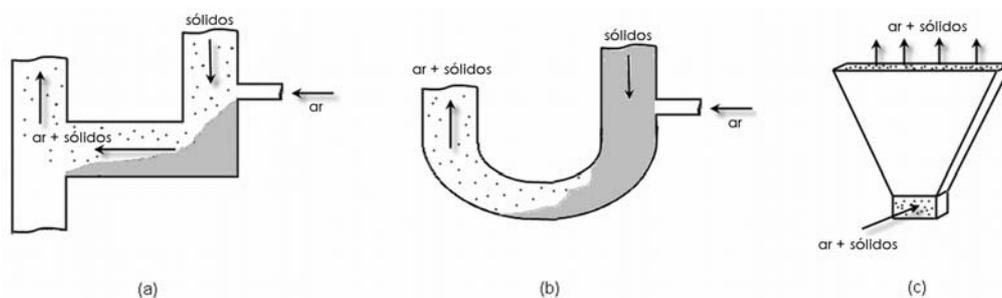


Figura 2.1 Válvulas não-mecânicas: (a) válvula-L; (b) válvula-J; (c) válvula-V (Klinzing et al., 1997)

A válvula-L, mais especificamente, é formada por dois tubos, um horizontal e um vertical, que unidos se configuram em um L. A entrada de

aeração nesse tipo de válvula será posicionada em algum ponto do tubo vertical e a saída da válvula, no final do tubo horizontal, estará conectada ao equipamento de processo.

Knowlton e Hirsan (1978) realizaram um importante estudo de caracterização de uma válvula-L. O equipamento utilizado por eles para essa caracterização era um sistema de recirculação constituído de um transportador pneumático vertical, um reservatório de sólidos, um tubo de descida e a válvula-L que alimentava o transportador. Os autores utilizaram materiais de diferentes diâmetros e densidades (areia – $d_p = 500, 260$ e $190 \mu\text{m}$; carvão e siderita – $d_p = 190 \mu\text{m}$) e variaram a localização da entrada de aeração, além do diâmetro e comprimento da válvula-L. Nesse estudo, foi mostrado que o escoamento dos sólidos na válvula é semelhante a de um leito deslizante e, a baixas vazões de sólidos (comandadas pela taxa de aeração externa), grande parte dos mesmos ficam estagnados no tubo horizontal e na curva da válvula. Ao aumentar-se a taxa de aeração, aumentando conseqüentemente a vazão de sólidos, a região estagnada diminui e a altas vazões, quase todo material particulado escoava (Figura 2.2).



Figura 2.2 Comportamento dos sólidos através da válvula-L a diferentes vazões de sólidos

Com a variação das características da partícula, como a densidade e o diâmetro, os autores mostraram que a mínima vazão de aeração requerida para o início do escoamento dos sólidos foi proporcional a esses parâmetros, isto é, a quantidade de ar necessária para a operação da válvula será tanto maior quanto maior for o diâmetro e a densidade das partículas transportadas. Já a perda de carga na válvula mostrou-se dependente apenas da variação da densidade das partículas, não sendo afetada pela variação de seu diâmetro.

Das dimensões da válvula, a modificação dos diâmetros das secções horizontal e vertical também afetou a variação daquelas grandezas: a vazão de aeração mínima foi proporcional ao diâmetro da secção vertical e a perda de carga na válvula foi inversamente proporcional ao diâmetro da secção horizontal.

Knowlton e Hirsan (1978) também mostraram que outra característica responsável pelo bom desempenho da válvula-L é a distância entre entrada da aeração e a secção horizontal da válvula. Os autores concluíram que a localização ótima da entrada de aeração é tão próxima quanto possível da curva da válvula, podendo oferecer então o maior fluxo de sólidos através da mesma. Foi mostrado que quando a entrada da aeração na válvula-L está localizada na linha central do tubo horizontal ou abaixo da mesma, como mostrado na curva (A) do gráfico esquemático da Figura 2.3, a vazão de sólidos aumenta até um valor máximo e então decresce com o aumento da aeração. Este comportamento precário é atribuído ao desvio da aeração em canais preferenciais na secção horizontal. Para entradas localizadas acima da curva, a vazão de sólidos aumenta com o aumento da aeração (curva (D) da Figura 2.3). Nestes casos, devido à proximidade que a entrada de aeração tem da curva, praticamente todo ar fica disponível para o

transporte dos sólidos através da válvula, resultando na sua melhor performance. Conforme a entrada de aeração se afasta da secção horizontal, isto é, se localize muito acima da curva, a vazão de aeração necessária para iniciar o transporte de sólidos será maior e a vazão máxima de sólidos obtida diminuirá, como pode ser visto ao se comparar as curvas (B), (C) e (D) da Figura 2.3.

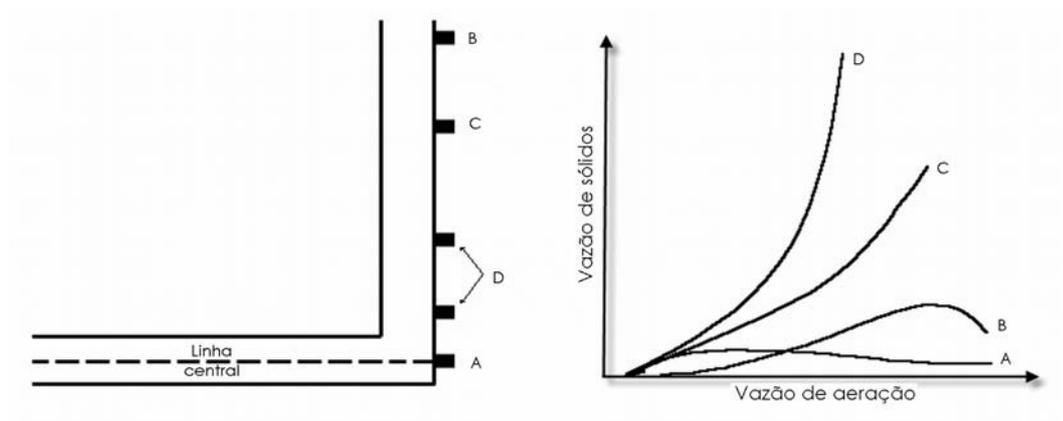


Figura 2.3 Comportamento da válvula em relação ao escoamento dos sólidos para diferentes localizações de entrada de aeração

Esse comportamento pode ser explicado pelas mudanças no balanço de pressão em torno de todo o sistema causadas pela mudança da posição da entrada de aeração. O balanço de pressão do sistema estudado por esses autores é formado por alguns componentes, conforme apresentado na Figura 2.4. A queda de pressão ao longo do sistema será balanceada pela soma da queda de pressão de cada um dos componentes (secção vertical, secção horizontal, transportador pneumático e curva), igualada à queda de pressão no tubo de descida. Com o aumento da vazão de aeração e conseqüente aumento na vazão de sólidos, maior será a perda de carga nos componentes do sistema. Quanto mais alta for a entrada de aeração, menor será o tubo de descida, sendo então menor sua capacidade de absorver a queda de pressão dos demais componentes. Dessa forma, para tubos de descida menores (ou entradas de aeração mais altas), a máxima capacidade de balancear a

queda de pressão em todo o sistema se dará a vazões de sólidos menores que em tubos de descida maiores. Portanto a localização da entrada de aeração e a altura do tubo de descida acima da mesma são responsáveis pela limitação da máxima vazão de sólidos obtida pela válvula.

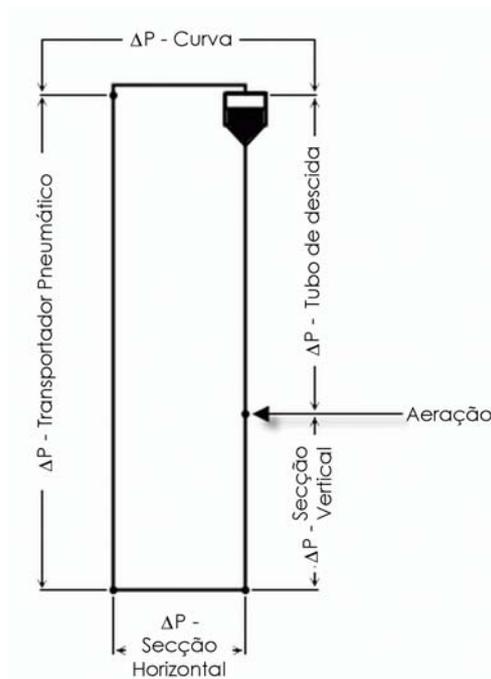


Figura 2.4 Balanço de pressão ao longo do sistema de recirculação

Geldart e Jones (1991) realizaram um estudo visando a caracterização da válvula-L. Utilizaram partículas do grupo B de Geldart e estudaram, além da influência das características das partículas e das dimensões da válvula (diâmetros internos que variavam entre 40, 70 e 100 mm), a influência do ângulo entre os componentes da válvula-L (tubo horizontal e vertical) e do número de pontos de aeração. O equipamento utilizado era constituído de um reservatório de sólidos, uma válvula-L com a extremidade aberta à atmosfera e um tubo de ligação entre eles, como mostrado na Figura 2.5.

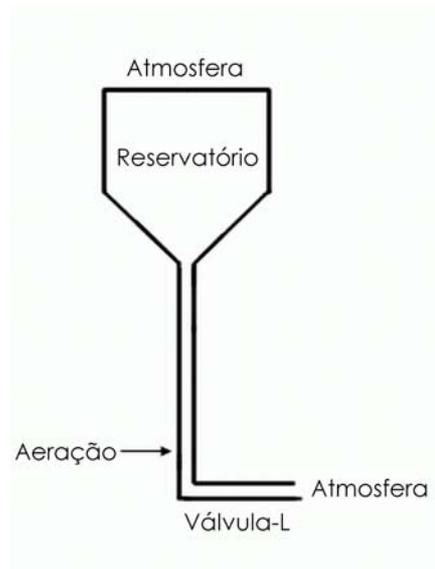


Figura 2.5 Representação esquemática do equipamento de Geldart e Jones (1991)

Os autores realizaram ensaios com uma ampla faixa de vazões de aeração e chegaram a resultados em que a vazão de sólidos máxima é atingida, sendo que qualquer aumento na injeção de gás causará uma redução na vazão de sólidos. Knowlton e Hirsan (1978) atribuíram esse comportamento à fluidização que ocorre no tubo de descida quando o gradiente de pressão neste atinge o valor de mínima fluidização, sendo que se tratava de um sistema de recirculação, onde a queda de pressão na linha de transporte pneumático deveria ser balanceada pela queda de pressão no tubo de descida. Porém, no caso de Geldart e Jones (1991), a válvula-L descarrega diretamente para a atmosfera e segundo suas conclusões o que irá limitar a descarga de sólidos será o tamanho da saída do reservatório. Para esses autores, se a válvula-L requer uma vazão de sólidos maior que a saída do reservatório pode oferecer, o tubo de descida começa a se esvaziar. Dessa forma, a resistência à passagem do ar acima do ponto de aeração diminui, aumentando a porção de ar da aeração no tubo de descida, diminuindo o ar disponível para o transporte através da válvula. Isso causará uma diminuição brusca do transporte.

Dessa forma o escoamento fica instável e um aumento da vazão de aeração pode causar um estrangulamento da saída do reservatório.

Dessa forma, os autores calcularam a máxima vazão de sólidos ($W_{s,max}$) oferecida pelo reservatório através da equação de Carleton (in Geldart e Jones, 1991), mostrada a seguir.

$$g = \frac{4 \cdot V^2 \cdot \text{sen } \beta}{D_t} + \frac{15 \cdot \rho_f^{1/3} \cdot \mu^{2/3} \cdot V^{4/3}}{\rho_p d_p^{5/3}} \quad (2.1)$$

onde:

$$V = \frac{4 \cdot W_{s,max}}{\rho_L \cdot \pi \cdot D_t^2} \quad (2.2)$$

onde: g é a aceleração da gravidade, β é o ângulo da metade da secção cônica do reservatório, V é a velocidade absoluta dos sólidos, D_t é o diâmetro da saída do reservatório (igual ao diâmetro do tubo de descida) e ρ_L é a densidade do leito descendente.

As vazões máximas calculadas chegaram a resultados muito próximos das obtidas experimentalmente, o que fez os autores concluírem que, para válvulas descarregando à pressão atmosférica, a vazão máxima obtida pela válvula pode ser a vazão máxima oferecida pela saída do reservatório. Já para válvulas que alimentam algum sistema, seja ele um transportador pneumático ou outro equipamento, devido à pressão exercida na saída da válvula, o máximo transporte que se consegue é aquele quando a perda de carga no tubo de descida se aproxima da de um leito fluidizado.

Nesse trabalho, foram desenvolvidas correlações para a previsão do escoamento de sólidos fornecido pela válvula-L através de dados de velocidade da

aeração no tubo e de mínima fluidização e da diferença de pressão na válvula em função do fluxo de sólidos, do diâmetro da válvula e do diâmetro de partícula utilizado. Essas correlações e suas faixas de validade estão mostradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Correlações de Geldart e Jones (1991) para previsão de G_s e ΔP_{VL}

<i>Variável</i>	<i>Equação</i>	<i>Validade</i>
G_s	$\frac{G_s}{D_t} = 3354 \cdot \frac{U_{aer}}{U_{mf}} - 2965 \quad (2.3)$	D_t (40 mm – 100 mm) d_p (280 μm – 790 μm) L_H (55 cm)
ΔP_{VL}	$\frac{\Delta P_{VL}}{L_H} = \frac{216 \cdot G_s^{0,17}}{D_t^{0,63} \cdot d_p^{0,15}} \quad (2.4)$	

Outros autores, como Smolders e Baeyens (1995), também estudaram a caracterização da válvula-L aberta para a atmosfera. Estes trabalharam com partículas do grupo B e D da classificação de Geldart em válvulas-L com diâmetros internos entre 20 e 40 mm, sendo um dos poucos trabalhos na literatura que estudaram válvulas de dimensões reduzidas, com diâmetros abaixo de 30 mm. Chegaram a conclusões muito próximas às de Geldart e Jones (1991) e também desenvolveram correlações para a estimativa do fluxo de sólidos e da diferença de pressão na válvula, além de correlação para o cálculo da máxima vazão de sólidos obtida na saída de um reservatório, de acordo com o diâmetro de sua saída e as dimensões das partículas utilizadas (Tabela 2.2). Porém, fizeram ressalvas à utilização das correlações para válvulas de diâmetros internos abaixo de 25 mm, já que obtiveram resultados visivelmente diferentes que para os outros tamanhos de válvula-L. Para a válvula de 20 mm de diâmetro interno, estudada por Smolders e Baeyens (1995), foi constatado que o fluxo mássico de sólidos máximo é atingido

a taxas de aeração menores e suas perdas de cargas se mostraram maiores para um mesmo valor de fluxo de sólidos que para as válvulas de diâmetros maiores.

Tabela 2.2 Correlações para previsão de G_s e ΔP_{VL} de Smolders e Baeyens (1995)

<i>Variável</i>	<i>Equação</i>	<i>Validade</i>
G_s	$\frac{G_s}{D_t} = 780 \cdot \left(\frac{U_{aer}}{U_{mf}} \right)^2 \quad (2.5)$	D_t (25 mm – 40 mm) d_p (137 μ m – 950 μ m) L_H (20 cm – 40 cm)
ΔP_{VL}	$\frac{\Delta P_{VL}}{L_H} = \frac{3500 \cdot G_s^{0,30} \cdot d_p^{0,10}}{L_H^{0,70}} \quad (2.6)$	

Alguns autores realizaram estudos sobre a utilização da válvula-L aplicada a sistemas de leito fluidizado circulante (CFB). Rhodes e Laussmann (1992) trabalharam com um leito fluidizado circulante e analisaram o efeito de parâmetros operacionais como a velocidade superficial do gás, o escoamento de sólidos circulante e o inventário de sólidos no balanço de pressão, analisando os diferentes componentes do equipamento. Dividindo o sistema em 4 componentes: o leito de transporte, a seção superior, o reservatório e a válvula-L e medindo a diferença de pressão em cada um destes, os autores verificaram a influência de cada um dos componentes no balanço geral de pressão. Assim como Knowlton e Hirsan (1978), os autores descreveram o balanço de pressão no sistema de recirculação como o somatório de todas as diferenças de pressão igualado a zero, sendo que um dos componentes será a parte dependente do balanço.

Através do estudo do balanço de pressão, os autores verificaram que a mudança no inventário de sólidos (mantendo-se os outros parâmetros constantes) não apresenta efeitos na diferença de pressão ao longo do leito e na seção

superior. Porém, com o aumento do inventário de sólidos, há um aumento linear na diferença de pressão do reservatório devido ao constante escoamento de ar através do leito fixo contido no reservatório, que terá maior altura, já que há maior quantidade de sólidos. E para que o balanço de pressão se mantenha, há o aumento na diferença de pressão da válvula-L.

Silva et al. (1994) estudaram o desempenho da válvula-L em leito fluidizado circulante, utilizando areias de três diâmetros diferentes e uniformes (200, 548, e 920 μm) e uma mistura constituída de partículas de menor (20%) e de maior (80%) diâmetro. Os autores confirmaram que a taxa de aeração requerida é proporcional e que a queda de pressão na válvula é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula. No que se refere à mistura de partículas, notou-se que se necessita uma menor aeração de ar para o escoamento dos sólidos em relação à operação com diâmetro uniforme, devido à predominância da recirculação de partículas menores no equipamento. Verificaram também que o comportamento da queda de pressão apresentou-se próximo ao da partícula de menor diâmetro presente na mistura, mostrando a predominância de partículas finas na válvula de recirculação. Os autores concluíram que o desempenho da válvula-L é mais regular para partículas finas, tendo-se observado uma grande dispersão nos dados experimentais obtidos para as partículas maiores.

Outros autores que estudaram a válvula-L aplicada a um leito fluidizado circulante foram Arena et al. (1998). Seguindo uma linha parecida com a de Rhodes e Laussmann (1992), estes autores também se valeram da análise do balanço de pressão ao longo de todo o sistema de recirculação, utilizando-se de materiais com diâmetros e densidades diferentes, pertencentes aos grupos A e B

de Geldart. Através de seus estudos, os autores observaram que o aumento da vazão de aeração determina um aumento na vazão de sólidos, como já havia sido relatado nos trabalhos anteriores, e na perda de carga da válvula, sendo que a diferença de pressão no tubo de descida também aumenta para equilibrar o balanço de pressão. Os autores também relacionaram o efeito do diâmetro e da densidade das partículas na fluidodinâmica do sistema de recirculação e concluíram que um aumento tanto no diâmetro quanto na densidade da partícula, provoca uma diminuição na faixa de operação da válvula-L. Além disso, foi desenvolvida uma correlação para a previsão da diferença de pressão na válvula através do fluxo de sólidos, do diâmetro da válvula (validade: 27 mm – 152 mm), do diâmetro de partícula utilizado (validade: 73 μm – 509 μm) e da densidade do leito descendente (validade: 1570 – 1660 kg/m^3), mostrado a seguir.

$$\frac{\Delta P_{VL}}{L_H} = \frac{0,0649 \cdot G_s^{0,178} \cdot \rho_L^{0,996}}{D_t^{0,574} \cdot d_p^{0,237}} \quad (2.7)$$

Yang e Knowlton (1993) desenvolveram equações empíricas para a caracterização da válvula-L, considerando-a como uma válvula pseudo-mecânica atuada pneumaticamente, aplicando, dessa maneira, equações desenvolvidas para válvulas mecânicas. A uma mínima taxa de aeração externa, dependendo das propriedades das partículas e da configuração da válvula, a operação da válvula se inicia. Primeiramente, apenas os sólidos em uma pequena porção no topo do tubo horizontal começa a escoar, ficando as demais partículas estagnadas. Da mesma maneira, apenas uma pequena porção no tubo vertical é operacional. Com o aumento da taxa de aeração externa, a área da seção de sólidos que escoar aumenta. E, a uma taxa de aeração externa muito alta, toda a seção transversal da

válvula se torna ativa. Esse comportamento não é muito diferente do que ocorre em uma válvula mecânica.

A perda de carga da válvula-L é dada pela soma das perdas de carga da curva (desde a entrada de aeração até a porção horizontal da curva) e do tubo horizontal:

$$\Delta P_{Válvula-L} = \Delta P_{curva} + \Delta P_{Horizontal} \quad (2.8)$$

Segundo os autores, o termo de perda de carga na curva da válvula pode ser substituído pela equação de perda de carga para uma válvula tipo guilhotina, já que o escoamento dos sólidos em ambas situações é similar, isto é, $\Delta P_{curva} = \Delta P_{válvula\ guilhotina}$. Esta equação de perda de carga para a válvula deslizante relaciona a queda de pressão com a porosidade de mínima fluidização, com a vazão de sólidos e com o coeficiente de descarga da abertura da válvula guilhotina (C_{des}), que assume o valor de 0.5 segundo Leung et al. (1987) (in Yang e Knowlton, 1993). A equação é mostrada a seguir:

$$\Delta P_{VálvulaDeslizante} = \frac{1}{2\rho_p(1-\varepsilon_{mf})} \left[\frac{W_s}{C_{des}A_0} \right]^2 \quad (2.9)$$

onde A_0 é a abertura da válvula guilhotina, C_{des} é o coeficiente de descarga de abertura da válvula deslizante e W_s é a vazão mássica de sólidos.

O termo de perda de carga do tubo horizontal pode ser previsto por equações de transporte pneumático para fase densa. Entretanto, esse termo foi desprezado pelos autores devido à dificuldade de adequar equações para descrever a perda de carga do braço horizontal da válvula, já que se trata de um curto espaço onde ocorre um transporte de sólidos instável que inclui a aceleração e desaceleração das partículas. Dessa forma, a perda de carga da válvula-L foi

descrita usando apenas o primeiro termo da equação, o de perda de carga da curva, representado pela equação de perda de carga para uma válvula guilhotina:

$$\Delta P_{Válvula-L} = \frac{1}{2\rho_p(1-\varepsilon_{mf})} \left[\frac{W_s}{C_{des}A_0} \right]^2 \quad (2.10)$$

A_0 , neste caso, irá representar a abertura da válvula-L, ou seja, a área equivalente à área de abertura da válvula guilhotina em que os sólidos irão escoar e esse parâmetro é dependente da aeração. Dessa forma, foram desenvolvidas pelos autores algumas equações empíricas que relacionam a aeração externa com a abertura da válvula. Na Tabela 2.3, estão apresentadas as equações desenvolvidas com a utilização dos dados dos trabalhos de Knowlton e Hirsan (1978) e Geldart e Jones (1991).

Tabela 2.3 Correlações para determinação da abertura da válvula

$$\frac{Q_t}{(\pi/4)D_H^2L_H} = 0,177 + 0,710 \frac{U_t A_0}{(\pi/4)D_H^2L_H} \quad (2.11)$$

$$\frac{Q_t}{(\pi/4)D_H^2L_H} = 0,141 + 0,753 \frac{U_t A_0}{(\pi/4)D_H^2L_H} \quad (2.12)$$

$$\frac{Q_t}{(\pi/4)D_H^2L_H} = a + b \frac{U_{mf} A_0}{(\pi/4)D_H^2L_H} \quad (2.13)$$

$$\frac{Q_t}{U_{mf} D_H L_H} = a + b \left[\frac{U_t}{U_{mf}} \right] \frac{A_0}{D_H L_H} * \quad (2.14)$$

$$\frac{Q_t}{(\pi/4)D_H^2 U_{mf}} = a + b \left[\frac{U_t}{U_{mf}} \right] \frac{A_0}{D_H^2 (\pi/4)} * \quad (2.15)$$

* Unidades: Q_t (ft³/s), D_H (ft), L_H (ft), A_0 (ft²), U_t (ft/s)

Os parâmetros “a” e “b” são constantes das correlações. Q_t é a vazão volumétrica total de gás na válvula e é dada pela equação:

$$Q_t = Q_{aer} + Q_{DC} \quad (2.16)$$

onde Q_{aer} é a vazão da aeração externa e Q_{DC} é a vazão volumétrica do gás arrastado juntamente com o leito deslizante de partículas. Q_{DC} pode ser estimado pela seguinte equação:

$$Q_{DC} = \frac{W_s \varepsilon_{mf}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.17)$$

Na literatura, os trabalhos a respeito da válvula-L são variados, como apresentado, descrevendo a caracterização do alimentador de várias dimensões, apesar de que o estudo de válvulas de pequeno tamanho foi bastante negligenciado. Além disso, a literatura apresenta vários trabalhos sobre a operação da válvula-L em Leitos Fluidizados Circulantes e poucos sobre a operação da mesma em equipamentos de transporte pneumático.

2.2. Considerações sobre Transporte Pneumático

O transporte pneumático de sólidos particulados pode ser amplamente classificado em dois tipos de regime de escoamento: escoamento em fase diluída e o escoamento em fase densa.

O limite entre o escoamento em fase densa e em fase diluída não é claro, por isso existem diversas definições para essa transição entre uma e outra fase. A definição mais universalmente aceita, utiliza as velocidades de ‘choking’ e ‘saltation’ como limite entre as fases. O ‘saltation’ é um fenômeno que ocorre no transporte pneumático horizontal e, segundo Rhodes (1990), ocorre quando há um leito de sólidos acomodados na parte inferior da tubulação, enquanto partículas são transportadas em suspensão sobre esse leito. A velocidade de ‘saltation’ é a

que limita a fase densa e a fase diluída no transporte horizontal. O ‘choking’ ocorre no transporte pneumático vertical onde há uma transição brusca de uma suspensão diluída para uma suspensão com maior concentração de sólidos, onde estes são transportados em pulsos ou são transportados pela região central do tubo de transporte e retornam pela região adjacente à parede. Chong e Leung (1986) denominaram o transporte de sólidos em forma de pulsos como fase densa com ‘slugging’ (ou bolhas) e o transporte com recirculação de sólidos como fase densa sem ‘slugging’. A velocidade de choking é a velocidade que marca o limite entre a fase densa e diluída no transporte vertical.

Bi et al. (1998) apresentam três classificações distintas de ‘choking’ (A, B e C). O ‘choking’ tipo A ocorre quando começa haver acúmulo de sólidos na base do transportador, com a diminuição da velocidade do gás a uma vazão de sólidos constante. O ‘choking’ tipo B resulta da instabilidade causada pela interação entre o soprador ou o alimentador de sólidos e o transportador, quando uma pressão apropriada não pode ser mantida. E o ‘choking’ tipo C ocorre quando há uma transição com pulsos (‘slugging’) e é considerado como a definição clássica de ‘choking’. De acordo com as definições apresentadas, pode-se dizer que somente os ‘choking’s tipo A e C ocorrem devido ao escoamento.

Marcus et al. (1990) apresentaram um diagrama de queda de pressão por unidade de comprimento em função da velocidade superficial do gás, onde se pode visualizar a transição entre fase densa e diluída no transporte pneumático (Figura 2.6). A curva AB representa a queda de pressão devido ao escoamento somente do gás na tubulação vertical. A curva C1D é dada para uma vazão de sólidos G1 enquanto que a curva E2F é para uma vazão de sólidos G2, maior que

G1. Da mesma forma, a curva G3H, é dada para vazão G3, por sua vez, maior que G2. Os pontos representados pelos números 1, 2 e 3 são obtidos pela tangente de cada curva nos seus pontos mínimos e formam a curva de mínima queda de pressão que delimita os regimes de escoamento. A região à direita desta curva é onde ocorre a fase diluída e a região à esquerda é onde ocorre a fase densa. Pode-se notar que o limite entre as regiões de fase diluída e densa varia de acordo com a vazão de sólidos e com a velocidade superficial do ar. Dessa forma, a partir da fase diluída, chega-se a esse limite com a diminuição da velocidade de gás, a uma vazão de sólidos constante, ou aumentando-se a vazão de sólidos para uma velocidade de gás constante.

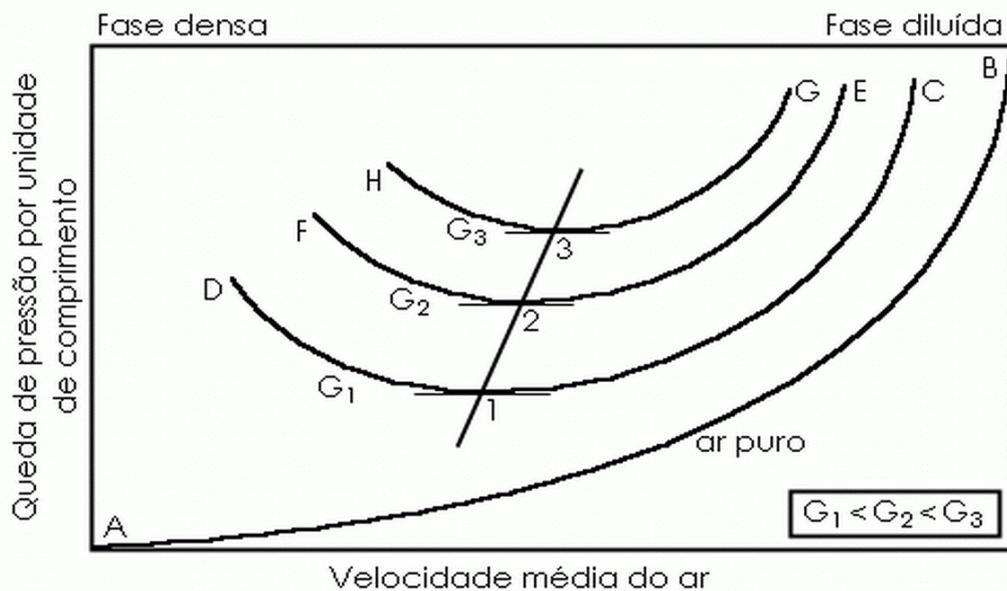


Figura 2.6 Diagrama geral de queda de pressão no leito pneumático em função da velocidade do gás (Marcus et al. 1990)

No caso do transporte pneumático vertical, no ponto C a concentração de sólidos é bem baixa e a velocidade do gás é alta, dessa maneira a força de atrito gás-parede predomina, causando uma queda de pressão relativamente alta. Ao se diminuir a velocidade do gás, a força de atrito gás-parede é minimizada,

diminuindo a queda de pressão, apesar da concentração de sólidos aumentar. Chega-se então no ponto de mínima queda de pressão em que dois fatores atuam igualmente: a força de atrito da mistura com a parede e a força peso dos sólidos (que é devido à sua concentração na suspensão). Nesse ponto, pode-se dizer que a velocidade do gás é a velocidade de choking tipo A, já que a força peso dos sólidos começa a predominar sobre a força de atrito (Costa et al., 2002). Diminuindo-se mais a velocidade superficial do ar, a concentração de sólidos aumenta rapidamente, fazendo com que a força peso comece a predominar e a força de atrito fluido-parede diminua cada vez mais devido às menores velocidades de gás. Até que se chega a um ponto (D) onde o gás não consegue mais sustentar todo o peso do sólido, iniciando-se então o escoamento com 'slugging'. Segundo Rhodes (1990), esse ponto (D) é denominado como a velocidade de 'choking' (ou 'choking' tipo C, segundo Bi et al., 1993) para a vazão G1.

Essa representação gráfica é uma das principais formas de indicar o limite entre as fases densa e diluída do transporte pneumático, caracterizando o regime de escoamento que está sendo desenvolvido. É importante ressaltar que as curvas são traçadas para vazões constantes de sólidos, isto quer dizer que este diagrama pode ser utilizado nos casos em que a alimentação de sólidos é feita independentemente da vazão de ar.

O comportamento fluidodinâmico do transporte pneumático, isto é, como o escoamento se desenvolve bem como qual regime está ocorrendo, pode ser afetado pelo tipo de alimentador de sólidos utilizado, como mostrou Costa (2001) em seu estudo sobre o escoamento nos regimes denso e diluído em transportador

pneumático vertical, onde foram utilizados três tipos diferentes de alimentadores: o gravitacional, o parafuso helicoidal e o tipo jorro. Em seu trabalho, a velocidade de mínimo gradiente de pressão, correspondente aos pontos 1, 2 ou 3 da Figura 2.6, apresentou, para os alimentadores gravitacional e parafuso helicoidal, valores superiores que aqueles obtidos para o tipo jorro, caracterizando uma influência do tipo de alimentação no desenvolvimento do escoamento no transporte pneumático, ressaltando que as diferenças foram encontradas entre os alimentadores do tipo dependente e independente da vazão de ar.

2.2.1. Região de Aceleração

Para qualquer sistema de transporte pneumático as partículas devem ser alimentadas à corrente gasosa e, dessa forma, vai existir um comprimento no qual a mistura gás-sólido não está em regime permanente, isto porque as partículas necessitam ser aceleradas até que atinjam uma velocidade de escoamento constante. As regiões de aceleração são caracterizadas pela variação nos perfis axiais de velocidade do gás e do sólido e de porosidade (Marcus et al., 1990). A velocidade com que as partículas entram na tubulação de transporte vai afetar o comprimento dessas regiões.

No estudo da região acelerada do transporte pneumático, é necessário determinar variáveis que caracterizam o escoamento, como a queda de pressão, porosidade e velocidades do fluido e dos sólidos, e sua variação em função da posição. Porém, nesta região, existem dificuldades na determinação da porosidade e velocidade dos sólidos, que limitam a verificação de equações utilizadas na modelagem matemática da região de entrada para os sistemas gás-sólido. Para o estudo fluidodinâmico, também é de grande interesse identificar o comprimento

da região de aceleração do tubo de transporte, a fim de se detectar a partir de que ponto as partículas atingem uma velocidade constante. O comprimento da região de entrada será dado em função de algumas características como o diâmetro do tubo de transporte, o diâmetro e densidade das partículas, o número de Reynolds do fluido e a porosidade (Bovo e Ferreira, 2002).

Experimentalmente, o comprimento da região de aceleração para o transporte pneumático em fase diluída pode ser obtido através do gráfico de pressão em função da distância axial do tubo de transporte, como pode ser observado na Figura 2.7. A posição a partir de onde o comportamento do perfil de pressão é linear, corresponde à região não acelerada do tubo.

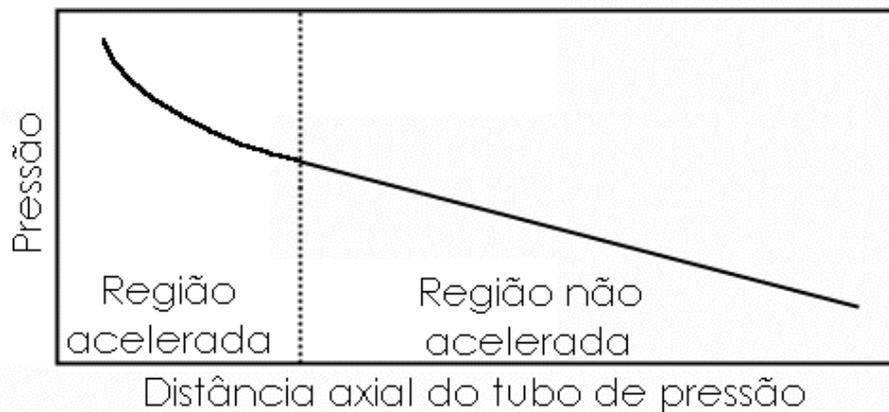


Figura 2.7 Curva característica para determinação experimental do comprimento da região de aceleração (Narimatsu, 2000)

O comprimento da região de aceleração ainda pode ser estimado por algumas correlações empíricas encontradas na literatura. Marcus et al. (1990) apresentam a seguinte expressão para o cálculo do comprimento de entrada:

$$\frac{L_{ra}}{D_t} = 0,527 \left(\frac{D_t}{d_p} \right)^{-1,26} \cdot \left(1 + \frac{W_s}{W_f} \right) \text{Re} \quad (2.18)$$

onde: L_{ra} é o comprimento de entrada do transporte pneumático, D_t é o diâmetro do tubo de transporte, d_p é o diâmetro de partícula, W_s e W_f são as vazões mássicas de sólidos e fluido e Re é o número de Reynolds.

As correlações geralmente propostas na literatura para determinar o comportamento fluidodinâmico da região de aceleração, entretanto, apresentam limitações, já que há muitas dificuldades para a determinação de parâmetros que caracterizam a dinâmica do escoamento, sendo restringidas, portanto, a uma pequena faixa de condições operacionais.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Foram utilizadas esferas de vidro ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$ e $\phi = 1$) na alimentação do leito de transporte pneumático vertical, com diâmetros médios na faixa de 260 μm , 470 μm (faixa B do diagrama de Geldart) e 1,01 mm (faixa D do diagrama de Geldart). A escolha do vidro foi feita para facilitar o estudo do comportamento da válvula, por ser um tipo de partícula de características bem conhecidas e já ser bastante estudada na literatura. A utilização de diferentes diâmetros possibilitou a análise da influência deste parâmetro no desempenho do alimentador de sólidos.

A Tabela 3.1 fornece as velocidades de mínima fluidização para cada diâmetro de partícula, estimadas através da equação de Ergun (in Kunii e Levenspiel, 1991):

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \left(\frac{\rho_f \cdot U_{mf} \cdot d_p}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \left(\frac{\rho_f \cdot U_{mf} \cdot d_p}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{\mu^2} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 Velocidades de mínima fluidização

<i>Diâmetro Médio da Partícula</i>	<i>Velocidade Mínima de Fluidização (m/s)*</i>
1,00 mm	0,621
470 μm	0,150
260 μm	0,044

* Dados para fluido a 25 °C

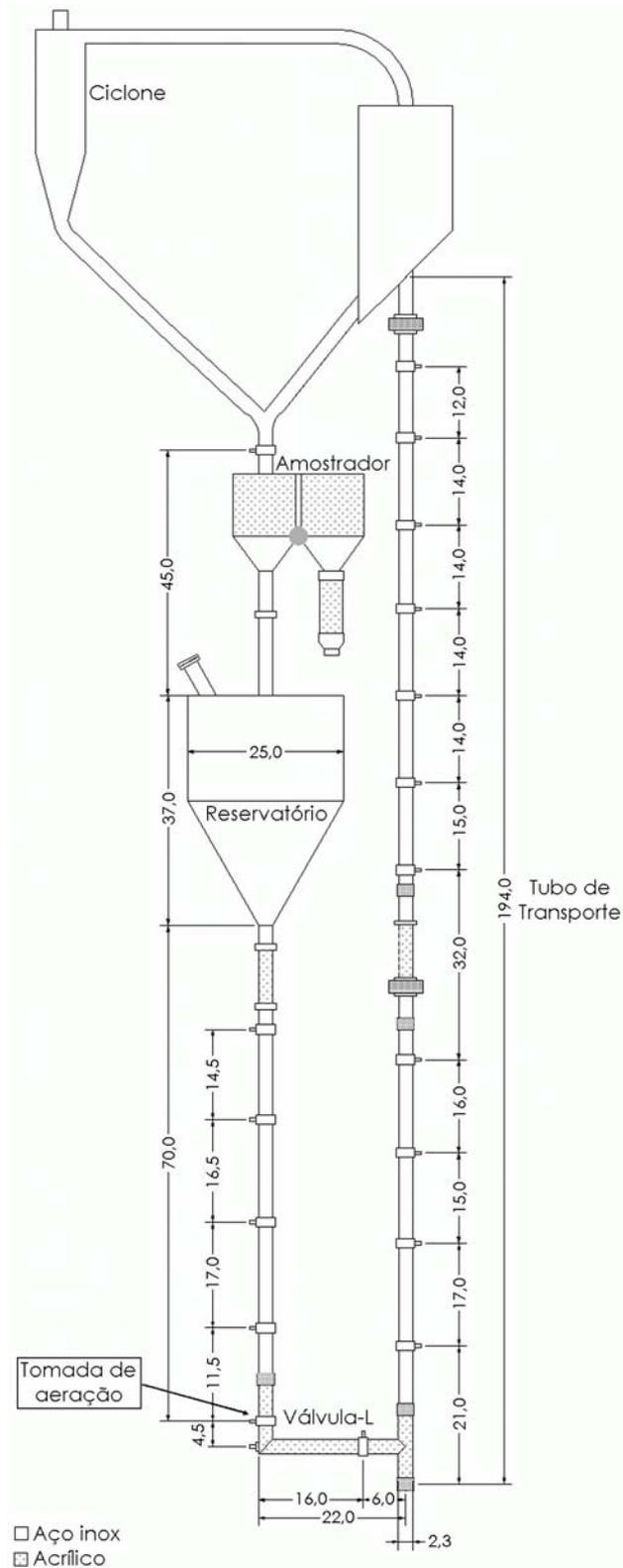
3.2. Equipamento

O item (a) Figura 3.1 representa o leito de transporte pneumático vertical utilizado e o item (b) apresenta a foto do equipamento. O leito construído em aço

inox é formado por um tubo de 1,95 m de altura e 23 mm de diâmetro interno. O tubo é ligado a uma seção cilíndrica superior com diâmetro interno de 15 cm, na qual o material é direcionado para a linha de reciclo.

Conectado à linha de reciclo há um ciclone tipo Lapple para receber as partículas mais finas que por ventura venham a se formar durante a operação do equipamento. Na linha de reciclo há uma caixa de amostragem de sólidos utilizada para as medidas de vazão de sólidos. Logo em seguida, há um reservatório onde os sólidos são alimentados, com diâmetro interno de 25 cm, altura total de 37 cm, e base cônica de 60° de abertura. Conectado a este há um tubo de descida (23 mm de diâmetro interno e 70 cm de altura) acoplado ao alimentador de sólidos utilizado no sistema, a válvula-L, que por sua vez, alimenta o material ao leito de transporte.

A válvula-L é constituída por um tubo de acrílico de 23 mm de diâmetro interno, dividido em duas seções: uma vertical de 5 cm de altura, onde está inserida a tomada de aeração, localizada 4,5 cm acima da linha central horizontal, e uma seção horizontal de 22 cm de comprimento. Foi escolhida essa posição de aeração seguindo as recomendações de Knowlton e Hirsan (1978) que concluíram que o melhor posicionamento da entrada da aeração seria logo acima da curva da válvula. Duas seções de acrílico estão posicionadas no tubo de transporte e no tubo de descida para a visualização do escoamento dos sólidos.



(a)

(b)

Figura 3.1 Tubo de transporte pneumático vertical com alimentador tipo válvula-L (medidas em cm)

No tubo de transporte estão instaladas 11 tomadas de pressão, conectadas a manômetros de água, distribuídas ao longo do comprimento. O tubo de descida que alimenta a válvula-L possui 4 tomadas de pressão distribuídas axialmente e, a válvula-L possui duas tomadas de pressão nos limites de sua seção horizontal. Uma tomada de pressão está instalada na linha de reciclo, logo acima da caixa de amostragem. As posições de cada uma das tomadas estão ilustradas na Figura 3.1.

Um soprador de 7,5 HP alimenta ar no sistema, através de uma tubulação de ferro galvanizado de 5,3 cm de diâmetro. A vazão de ar é controlada por duas válvulas tipo gaveta, sendo que uma delas controla a vazão de reciclo, permitindo trabalhar com vazões bem baixas de ar sem danificar o soprador. Nesta tubulação está acoplado um medidor de vazão tipo duplo-orifício conectado a um manômetro de água. No final da tubulação de alimentação, há uma redução conectada a uma mangueira flexível de diâmetro menor, que por sua vez, está conectada à entrada do leito.

A aeração da válvula é fornecida pela linha de ar comprimido do laboratório, conforme recomendação de Silva et al. (1994), que indica uma melhor operação da válvula com ar comprimido como fonte da aeração. A vazão de aeração é controlada manualmente por uma válvula agulha para haver maior precisão nas medidas que são realizadas por duas placas de orifícios diferentes, dependendo da faixa de aeração requerida.

O esquema de todo aparato pode ser visto na Figura 3.2.

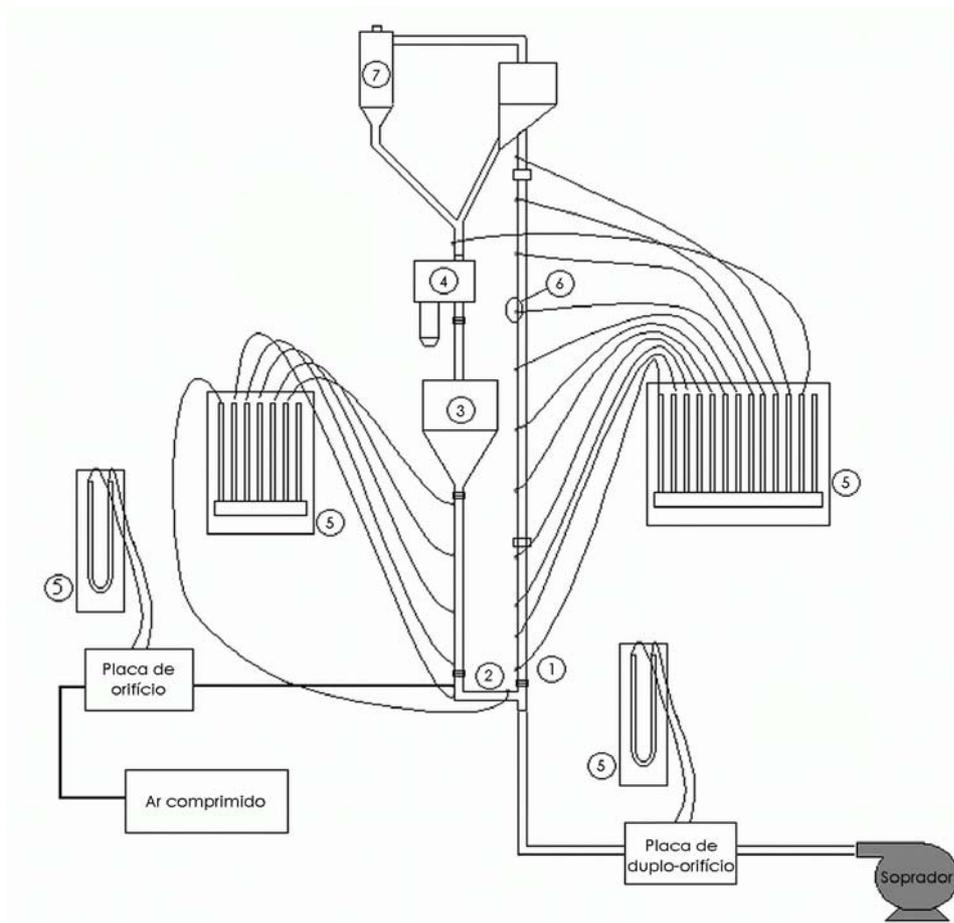


Figura 3.2 Esquema do aparato experimental: (1) tubo de transporte, (2) válvula-L, (3) reservatório de sólidos, (4) caixa de amostragem, (5) manômetros de água, (6) tomadas de pressão, (7) ciclone.

3.3. Sistemas de Medida

Durante os ensaios experimentais foram feitas realizadas medidas de vazão de ar, vazão de aeração, vazão de sólidos, perfil de pressão no leito, no tubo de descida e na válvula-L, segundo os métodos descritos a seguir, para cada uma das condições fornecidas.

3.3.1. Vazões de Ar e Aeração

A vazão de ar no tubo de transporte é obtida através da obtenção da vazão de ar alimentada ao sistema somada à vazão de aeração e descontada a vazão desviada para o tubo de descida. A vazão de ar fornecida pelo soprador é

determinada através do medidor tipo duplo-orifício, devidamente calibrado, conectado a um manômetro em “U”, onde são feitas leituras de diferença de altura (Δh). A equação de calibração da placa é:

$$Q_{ar} = 1,014\sqrt{T\Delta h} \quad (3.2)$$

onde T deve ser fornecido em K, Δh em centímetros de coluna de água (cm c.a.) e Q_{ar} é obtida em m^3/min . Essa equação de calibração é válida no intervalo de $0 < Q_{ar} \leq 0,067 m^3/s$.

A medida de vazão de aeração fornecida pela linha de ar comprimido é obtida através de duas placas de orifício diferentes, de acordo com a faixa de vazão de aeração requerida pela válvula-L. A equação de calibração de cada uma das placas e sua faixa de validade está mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Equações de calibração para as placas de orifício da linha de ar comprimido e suas respectivas validades de operação.

<i>Placa</i>	<i>Equação</i>	<i>Validade</i>
1	$Q_{aer} = 0,921 \cdot \sqrt{\Delta h}$ (3.3)	$1,4 \times 10^{-4} < Q_{aer} \leq 1,2 \times 10^{-3} m^3/s$
2	$Q_{aer} = 0,059 \cdot \sqrt{\Delta h}$ (3.4)	$2,0 \times 10^{-5} < Q_{aer} \leq 1,6 \times 10^{-4} m^3/s$

Δh fornecido em cm c.a.

A vazão de ar desviado para a linha de reciclo pode ser obtida através dos valores de queda de pressão no tubo de descida por unidade de comprimento ($\Delta P/L$) aplicados à equação de Forchheimer. Esta equação é aplicável para escoamento de fluido em leito fixo e já que o tubo de descida é preenchido de sólidos durante toda operação, pode-se fazer esse cálculo aproximado. A equação está mostrada a seguir (Massarani, 2002):

$$\frac{\Delta P}{L} + \rho_f g = \frac{\mu}{\kappa} U_{DC} + \frac{c\rho_f}{\sqrt{\kappa}} U_{DC}^2 \quad (3.5)$$

onde c é estimado pela equação de Ergun:

$$c = \frac{0,14}{\varepsilon_{DC}^{3/2}} \quad (3.6)$$

onde a porosidade do leito no tubo de descida é considerada igual a 0,40, seguindo a literatura que traz valores experimentais de porosidade média de leito fixo de esferas entre 0,39 e 0,41.

A permeabilidade do leito κ pode ser estimada pela equação de Kozeny-Carman:

$$\kappa = \frac{d_p^2 \varepsilon_{DC}^3}{36\beta'(1 - \varepsilon_{DC})^2} \quad (3.7)$$

onde β' é um fator de forma adimensional que foi adotado como sendo igual a 5, já que a literatura mostra que este parâmetro está próximo a esse valor para leitos com porosidade até 50%.

A velocidade superficial do gás no tubo de descida (U_{DC}) pode ser obtida pela Equação (3.5), com a diferença de pressão obtida, com os valores de c e κ , obtidos pelas Equações (3.6) e (3.7) respectivamente e com os valores das propriedades físicas do ar estimadas nas condições de trabalho. Com o valor da velocidade superficial, da porosidade do leito e da área da seção transversal do tubo obtém-se a vazão de ar desviado. Entretanto, as vazões de ar desviado obtidas durante os experimentos se mostraram muito pequenas, em torno de no máximo 3% da vazão de ar total alimentada pelo soprador.

3.3.2. Vazão de Sólidos

A vazão de sólidos é obtida pela utilização de um sistema de coleta localizado na linha de reciclo. Nesse sistema (Figura 3.3), as partículas são desviadas para uma caixa de amostragem durante um tempo cronometrado e, a amostra coletada é, em seguida, pesada. O sistema de desvio do escoamento não interfere na vazão de ar da linha de reciclo, já que o mesmo possui tela perfurada que permite a passagem do ar.

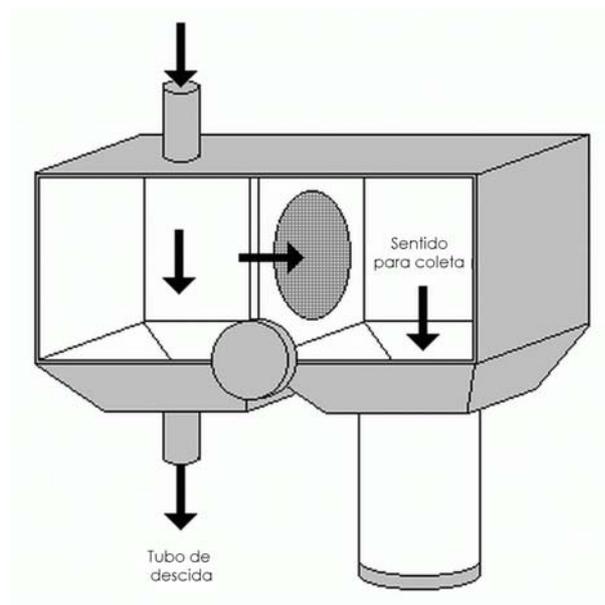


Figura 3.3 Sistema de amostragem de sólidos

3.3.3. Perfil de Pressão

O perfil axial de pressão do tubo de transporte é obtido através de 11 tomadas de pressão distribuídas ao longo do comprimento do mesmo, ligadas a manômetros de água formados por um conjunto de vasos comunicantes com 12 tubos de vidro. Há ainda uma outra tomada de pressão na linha de reciclo logo acima da caixa de amostragem, também ligada a um manômetro de água.

Da mesma maneira é medido o perfil de pressão axial ao longo do tubo de descida e da válvula-L, através de 6 tomadas de pressão, ligadas a manômetros de água.

3.3.4. Estimativa da Porosidade Média

A porosidade média na região de escoamento desenvolvido no tubo de transporte pode ser estimada através da equação de conservação de momento para a mistura proposta por Capes e Nakamura (1973):

$$\frac{d}{dz}(\rho_f \cdot u^2 \cdot \varepsilon) + \frac{d}{dz}[\rho_p \cdot v^2 \cdot (1-\varepsilon)] = \left(-\frac{dP}{dz}\right) - [(\rho_p - \rho_f) \cdot (1-\varepsilon) + \varepsilon \cdot \rho_f] \cdot g - F_f + F_p \quad (3.8)$$

Pode-se fazer as seguintes considerações para simplificar os cálculos:

- como se trata da região não-acelerada no tubo de transporte pneumático com escoamento plenamente desenvolvido, os dois primeiros termos da Equação (3.8) podem ser igualados a zero;
- a força de atrito partícula-parede (F_p) pode ser considerada desprezível, já que a porosidade no transporte pneumático é muito alta, acima de 0,98, e
- pode-se considerar a força peso do fluido desprezível em relação à força peso das partículas.

Dessa forma a equação para estimativa da porosidade média se apresenta a seguir como:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\left(-\frac{dP}{dz}\right) - F_f}{(\rho_p - \rho_f) \cdot g} \right) \quad (3.9)$$

onde F_f (força de atrito fluido-parede) é determinada através de uma equação desenvolvida a partir de dados experimentais em ensaios onde as medidas

de pressão ao longo do tubo pneumático são obtidas para o escoamento do fluido puro, sem a presença de partículas. A equação desenvolvida para o cálculo da força de atrito, mostrada a seguir, foi obtida com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,985.

$$F_f = 0,87 \cdot U^{1,84} \quad (3.10)$$

3.4. Procedimento Experimental

3.4.1. Operação da Válvula-L

Inicialmente o reservatório era preenchido com as partículas a serem transportadas. Com a saída da válvula-L aberta para a atmosfera, iniciava-se a alimentação da aeração a uma vazão pré-estabelecida. Em seguida, era feita a medida de vazão de sólidos através da coleta de uma determinada massa em um tempo cronometrado. O procedimento foi repetido para as demais condições, isto é, demais vazões de aeração e tamanhos de partículas. Devido a limitações na capacidade do reservatório, não era possível fazer medidas simultâneas da vazão e do perfil de pressão no tubo de descida e na válvula-L, já que o esvaziamento do reservatório era muito rápido. Considerando que as medidas de vazão de sólidos apresentaram uma boa reprodutibilidade, foram realizadas medidas de perfil de pressão em ensaios onde foram estabelecidas as mesmas condições operacionais dos ensaios de obtenção de vazão de sólidos.

O esquema do aparato utilizado nestes ensaios está mostrado na Figura 3.4.

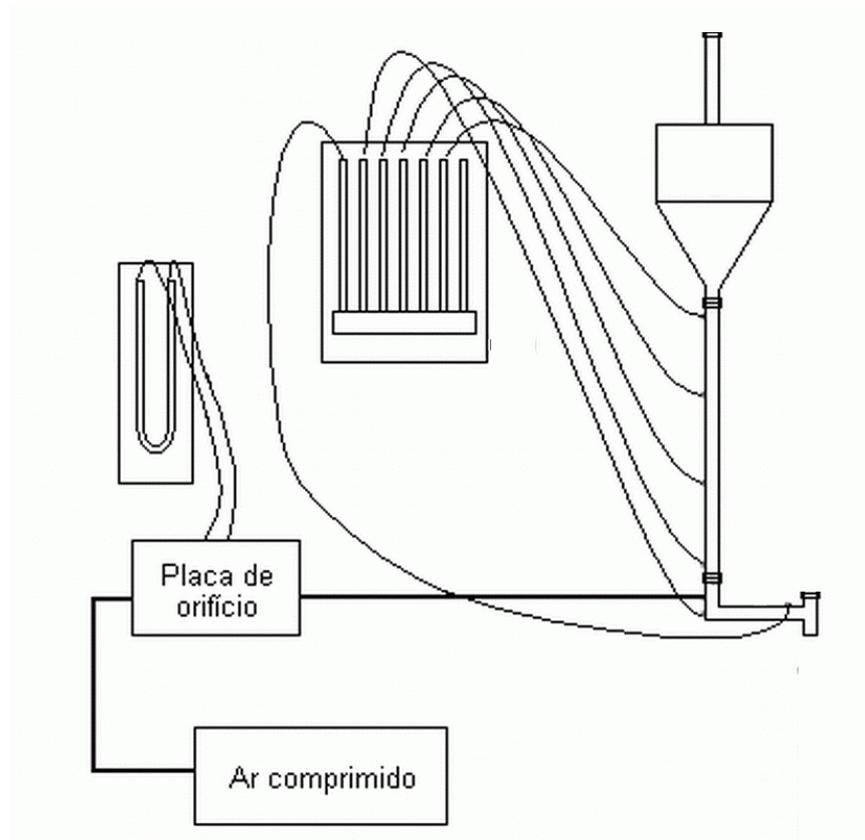


Figura 3.4 Esquema do aparato experimental para a caracterização da válvula-L

3.4.2. Operação da Válvula-L na Linha de Transporte Pneumático

Da mesma maneira, o reservatório era preenchido com as partículas antes da operação do sistema. O soprador era ligado, com a válvula ajustada para oferecer uma vazão de ar determinada. A válvula da linha de ar comprimido era aberta e através da válvula agulha da linha a vazão de aeração era definida. Iniciado o transporte das partículas, esperava-se que a temperatura do ar que escoava no leito se estabilizasse e permanecesse constante. A leitura dos manômetros conectados às tomadas de pressão do sistema, ao medidor tipo duplo-orifício e à placa de orifício da linha de ar comprimido era então realizada. A vazão de sólidos era determinada pesando-se os sólidos coletados na caixa de amostragem,

durante um tempo cronometrado. O procedimento era repetido para as demais condições com vazões de ar e de aeração diversas, para os diferentes tamanhos de partícula.

Para esse tipo de experimento, deve-se tomar o cuidado de obedecer alguns limites de operação, superiores e inferiores, os quais, quando atingidos e se realizarem ensaios nas imediações destes, podem causar instabilidades na operação do equipamento. Quando um limite inferior for alcançado, pode ocorrer a interrupção do fornecimento de sólidos pela válvula a qualquer momento da operação e, quando o limite superior é atingido, pode ocorrer um fornecimento de sólidos a uma vazão acima da qual a vazão de ar é capaz de transportar, causando o entupimento do leito. Para os experimentos realizados nesse trabalho, os limites superiores e inferiores estão mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Limites de operação para as condições utilizadas neste trabalho

<i>Limites</i>	<i>Diâmetro de partícula</i>	<i>Q_{aer} (m^3/s)</i>
Inferior	1,00 mm	0,000210
	470 μm	0,000064
Superior	1,00 mm	0,000330
	470 μm	0,000104
$Q_{ar} = 0,0055 m^3/s$		

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo foi realizado em duas etapas diferentes: na primeira etapa foram feitos ensaios para a caracterização do comportamento operacional da válvula-L isoladamente e, na segunda, foi estudada sua operação na linha de transporte pneumático. Nesta etapa, foram medidos os perfis de pressão estática no tubo de transporte, as vazões de ar, aeração e sólidos e foram feitas estimativas da porosidade no leito pneumático.

4.1. Caracterização da Válvula-L

4.1.1. Ensaios Preliminares

Para identificar as faixas de operação, verificar os sistemas de medida e a reprodutibilidade dos dados, foram feitos ensaios preliminares usando os três diâmetros de partículas estudados com vazões de aeração variando de acordo com as faixas mostradas na Tabela 4.1. É importante ressaltar que os limites máximos de operação não foram atingidos nesses ensaios.

Tabela 4.1 Condições experimentais para os ensaios preliminares

<i>Diâmetro de Partículas</i>	<i>Vazão de Aeração (m³/s)</i>	
	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
1,00 mm	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$
470 μm	$1,8 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-5}$
260 μm	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$

Os gráficos obtidos estão mostrados na Figura 4.1. As curvas mostram que a vazão de sólidos aumenta abruptamente conforme aumenta a vazão de aeração fornecida e quanto maior é o diâmetro médio das partículas, maior a vazão de aeração requerida para o início do transporte na válvula. Esse comportamento está de acordo com os resultados dos trabalhos da literatura, como o de Knowlton e Hirsan (1978). Na faixa de vazões de aeração testadas, a vazão de sólidos aumenta desde 0(zero) a, aproximadamente, 0,0108 kg/s para partículas de 1 mm de diâmetro, de 0(zero) até 0,0062 kg/s para partículas de 470 μm e de 0(zero) até 0,0150 kg/s para partículas de 260 μm . Esses valores convertidos para fluxos mássicos, referentes à área da seção transversal da válvula, são, respectivamente iguais a 26,0 $\text{kg/m}^2\text{s}$, 14,9 $\text{kg/m}^2\text{s}$ e 36,1 $\text{kg/m}^2\text{s}$, indicando uma faixa de trabalho ampla neste tipo de alimentador de sólidos. Os dados foram apresentados juntamente com suas réplicas e trélicas o que permite observar a boa reprodutibilidade dos dados para a válvula-L estudada.

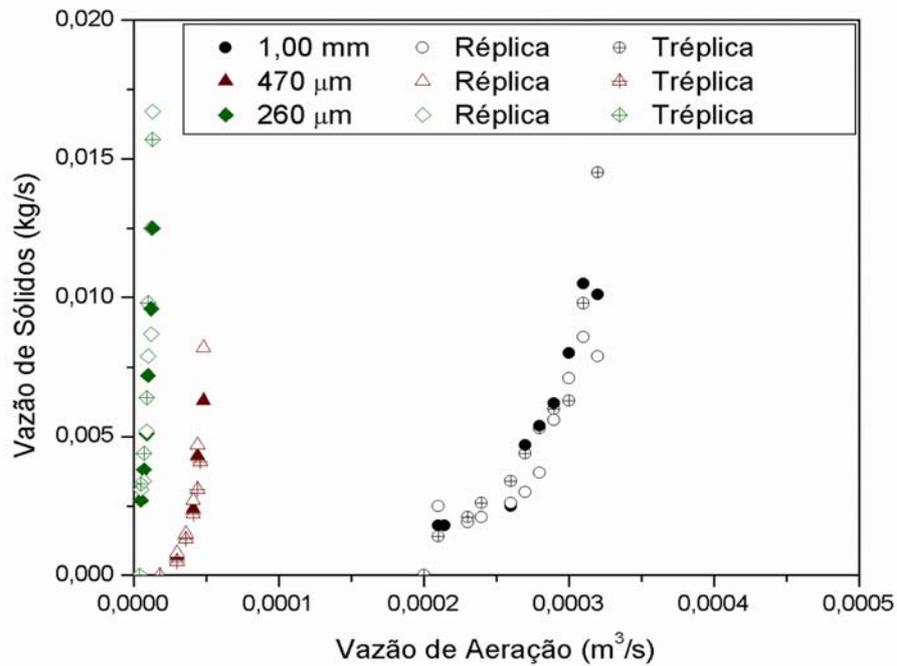


Figura 4.1 Vazões de sólidos em função da vazão de aeração para os três diâmetros médios de partícula (réplicas e trélicas)

As diferenças de pressão para a válvula-L em função da vazão de sólidos para os três diâmetros de partículas investigados com suas respectivas réplicas e trélicas estão mostradas na Figura 4.2. A medida de perda de carga na válvula é obtida pela diferença entre a pressão em cada uma das tomadas das extremidades do componente horizontal da válvula-L. Pode-se observar que, inicialmente, a diferença de pressão na válvula aumenta com o aumento da vazão de sólidos, mas tende a um valor constante a partir de, aproximadamente, uma vazão de 0,006 kg/s. De acordo com Knowlton e Hirsan (1978), a perda de carga na válvula-L não apresenta dependência com o diâmetro da partícula, já Arena et al. (1998) notaram que para partículas maiores as perdas de cargas eram menores. Os autores atribuíram esse comportamento ao fato de que partículas maiores formam leitos com maiores espaços entre partículas, reduzindo a resistência à passagem do ar

através da válvula-L. Esse comportamento foi notado nesses ensaios realizados, onde se pode perceber as perdas de cargas ligeiramente menores para as partículas de 1 mm de diâmetro. Para as demais partículas, essa diferença não pode ser notada claramente. Entretanto, para as vazões de sólidos abaixo de 0,006 kg/s, as quedas de pressão para as partículas de 260 μm se mostraram menores que as perdas de carga dos demais diâmetros de partículas.

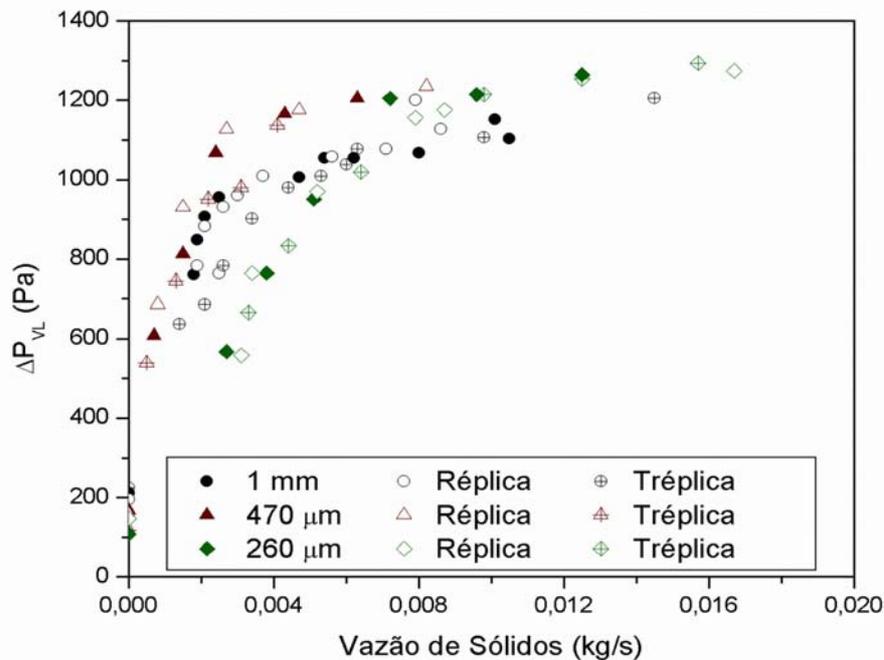


Figura 4.2 Diferença de pressão na válvula-L em função da vazão de sólidos para os três diâmetros de partículas (réplicas e trélicas)

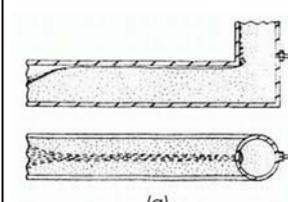
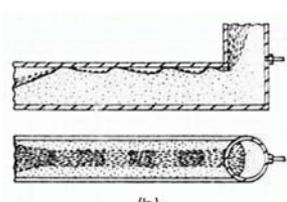
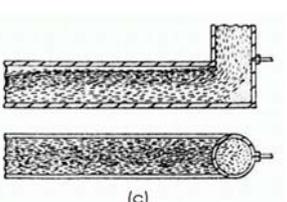
Deve-se ter cautela nas observações, porém, já que a reprodutibilidade destes dados não foi tão boa quanto no caso dos dados de vazões de sólidos, o que indica medidas mais suscetíveis às variações experimentais.

Completados os ensaios preliminares, foram obtidos dados adicionais para a caracterização da válvula-L, que serão descritos a seguir.

4.1.2. Padrões de Escoamento

A válvula-L construída em acrílico permitiu a observação visual de como se dá o escoamento dos sólidos dentro de seu interior. Os padrões observados e as faixas operacionais de cada um podem ser vistos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Padrões de escoamento e suas faixas operacionais

	<i>Faixas de Vazão de Aeração (m^3/s)</i>		
1,00 mm	$2,1 \times 10^{-4} - 2,5 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4} - 3,1 \times 10^{-4}$	acima de $3,1 \times 10^{-4}$
470 μm	$1,8 \times 10^{-5} - 4,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5} - 6,5 \times 10^{-5}$	acima de $6,5 \times 10^{-5}$
260 μm	$4,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-5}$	acima de $5,0 \times 10^{-5}$
			
	(a)	(b)	(c)

Para baixas vazões de sólidos (item (a) da Tabela 4.2) é observado uma grande região estagnada sob uma estreita corrente de sólidos que se move rapidamente no topo do tubo horizontal da válvula-L e um lento movimento descendente no tubo vertical. Os limites inferiores apresentados também representam as mínimas vazões de aeração requeridas para o início do transporte de partículas.

Conforme a vazão de sólidos aumenta, com o aumento da vazão de aeração, a região estagnada diminui de tamanho e então é detectada uma maior corrente de sólidos escoando na forma de “dunas” ou ondas, provocando pequenas oscilações na descarga de sólidos (item (b) da Tabela 4.2).

Para vazões de sólidos altas, a região de sólidos estagnados praticamente desaparece, restando apenas sólidos estagnados na curva da válvula, dando lugar a um escoamento rápido na forma de pulsos que ocupa todo o tubo horizontal, o que também provoca grandes oscilações na descarga dos sólidos; no tubo vertical também é identificado um leito descendente bem mais rápido que nos outros casos (item (c) da Tabela 4.2).

De modo geral o comportamento apresentado foi o mesmo descrito nos trabalhos de Knowlton e Hirsan (1978), de Geldart e Jones (1991) e de Smolders e Baeyens (1995).

4.1.3. Fluxos Mássicos de Sólidos

As vazões de aeração utilizadas nestes ensaios variaram dentro das faixas operacionais mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Condições experimentais para os ensaios de caracterização da válvula

<i>Diâmetro de Partículas</i>	<i>Vazão de Aeração (m^3/s)</i>	
	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
1,00 mm	$3,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-3}$
470 μm	$5,2 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-4}$
260 μm	$2,8 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-4}$

Os gráficos da Figura 4.3 confirmam o comportamento observado por Smolders e Baeyens (1995): a razão entre o fluxo mássico de sólidos e o diâmetro interno da válvula-L aumenta com o aumento da razão entre a velocidade da aeração e a velocidade mínima de fluidização, até que a partir da razão das velocidades de aproximadamente 3,0 a razão do fluxo de sólidos e do diâmetro da

válvula se estabiliza em aproximadamente um valor constante. Esse valor se aproxima de $16000 \text{ kg/m}^3\text{s}$, porém para as partículas de diâmetro médio de $470 \mu\text{m}$ as razões de fluxos de sólidos pelo diâmetro da válvula na faixa de razões das velocidades citada oscilam entre aproximadamente 18000 e $21000 \text{ kg/m}^3\text{s}$.

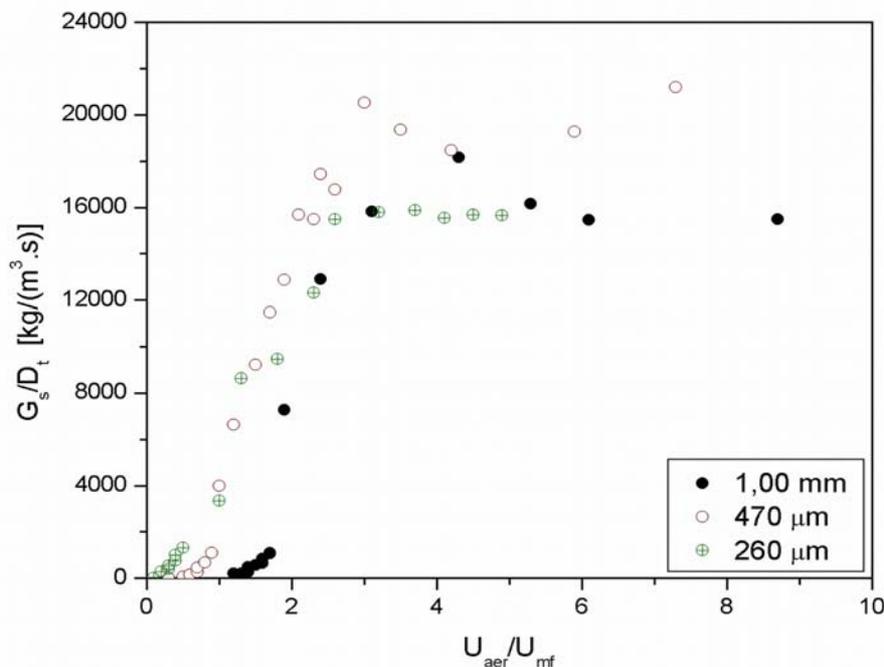


Figura 4.3 G_s/D_t em função de U_{aer}/U_{mf} para os três diâmetros de partículas estudados

Segundo Geldart e Jones (1991), para a válvula-L que descarrega diretamente para a atmosfera, o que irá limitar a descarga de sólidos será o tamanho da saída do reservatório. Dessa forma, os autores afirmam que a vazão máxima de sólidos que a válvula poderá oferecer será a máxima vazão de sólidos oferecida pelo reservatório, como foi demonstrado em seu trabalho. Porém, esses autores não consideraram a resistência que todo o restante do aparato além do reservatório (tubo de descida e válvula-L) oferecem ao escoamento dos sólidos, o que pode causar uma diminuição do valor máximo de vazão de sólidos que esco

pela válvula em relação à obtida na operação do reservatório apenas. No caso do trabalho de Geldart e Jones (1991), é possível que a resistência oferecida pelos componentes não tenha sido significativa o suficiente já que operaram com válvulas de diâmetros maiores.

No gráfico da Figura 4.4 estão apresentados os fluxos de sólidos máximos obtidos experimentalmente na saída do reservatório (situação 1), na saída do tubo de descida (situação 2) e na saída da válvula-L em operação (situação 3) para as partículas de 260 μm de diâmetro. O valor do fluxo máximo na situação 1 se apresentou 3,2 vezes maior que os valores máximos de fluxo de sólidos no ensaio de caracterização da válvula (situação 3) e o fluxo de sólidos máximo da situação 2 se apresentou 1,9 vez maior que o da situação 3 (49942 e 29735 $\text{kg/m}^3\text{s}$ respectivamente para as situações 1 e 2). Esses valores mostram que várias resistências contribuem para a redução de vazão observada no escoamento de sólidos na presença da válvula e também que a resistência oferecida pela válvula em si é considerável e deve ser levada em conta na análise dos limites de operação da válvula-L.

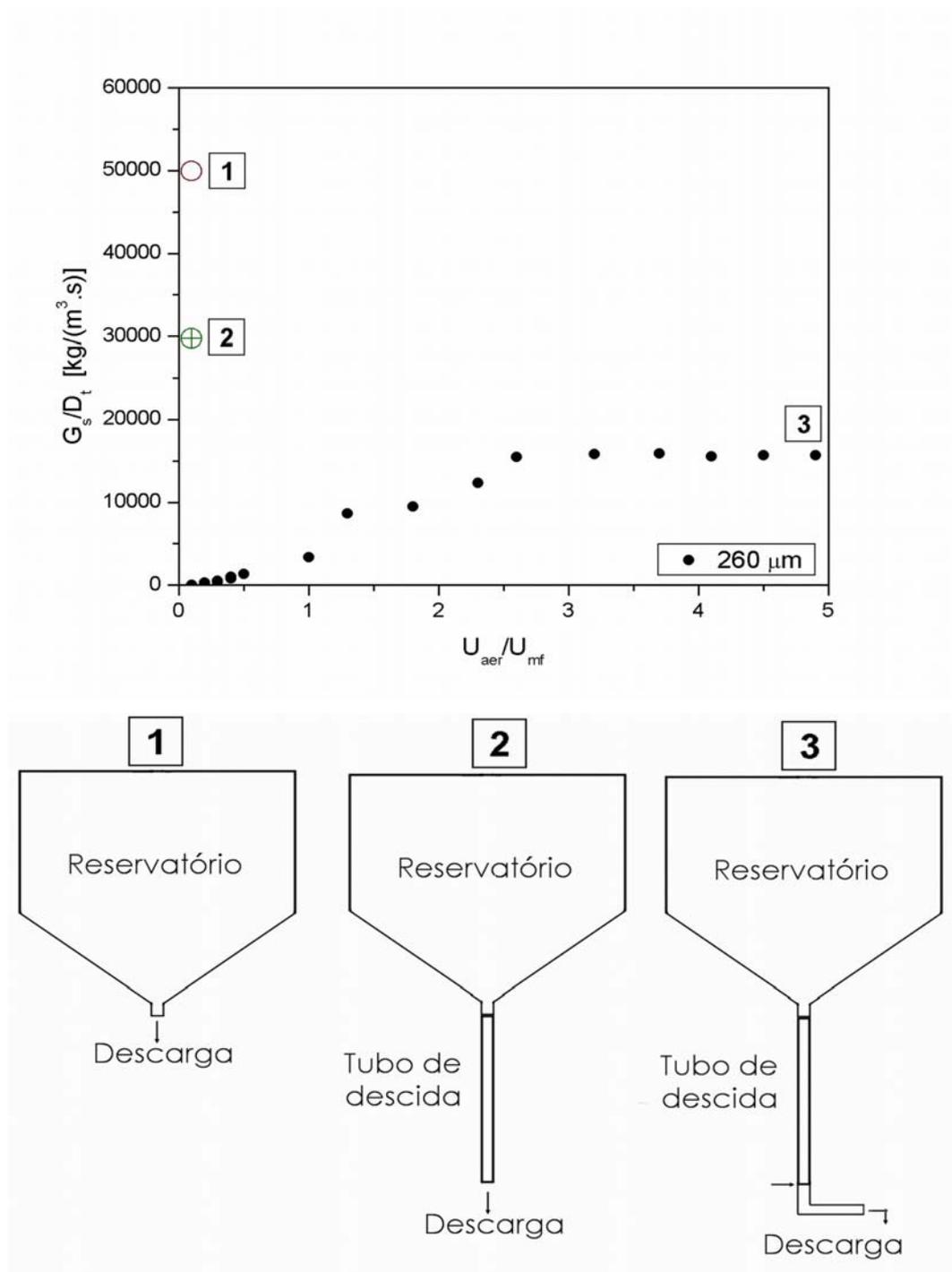


Figura 4.4 G_s/D_t para três configurações diferentes do aparato experimental

Para Smolders e Baeyens (1995), o fato dos fluxos de sólidos atingirem um patamar estável abaixo daqueles oferecidos pelo reservatório de sólidos aberto para a atmosfera e não aumentar continuamente até que se atinja o valor máximo, pode ser explicada pelo aumento de pressão que ocorre na saída do reservatório

após o acoplamento do tubo de descida e da válvula-L ao mesmo, resultando em um fluxo de sólidos menor. Além disso, pode-se inferir que existe uma resistência adicional na base da válvula-L, devido à sua geometria e às características do leito fixo depositado na parte inferior do tubo horizontal, que não diminui com o aumento da vazão de aeração. Essa resistência pode depender de alguns parâmetros como as características físicas da partícula, a geometria do cotovelo da válvula, o comprimento de cada um dos componentes da válvula, a distância entre a tomada de aeração e a linha central do tubo horizontal e ao diâmetro do tubo, como sugerem Tong et al. (2003) em um trabalho de modelagem fluidodinâmica do escoamento na válvula-L. Ou seja, a resistência seria resultante do atrito partícula-parede, que é menor ou maior dependendo de cada uma dessas características. A Figura 4.5 mostra as características observadas para o escoamento dos sólidos a altas vazões, como foi discutido no item 4.1.2 juntamente com alguns dos parâmetros que podem influir nesta resistência, como o diâmetro da válvula (D_t) e a distância entre a tomada de aeração e a linha central do tubo horizontal (L_a).



Figura 4.5 Representação o escoamento de altas vazões de sólidos

Segundo Geldart e Jones (1991), também seria esperado que o fluxo de sólidos começasse a diminuir a partir de determinada razão $U_{\text{aer}}/U_{\text{mf}}$ e não atingisse um patamar estável, pois se a válvula-L requerer uma vazão de sólidos maior que a saída do reservatório pode oferecer, o tubo de descida começa a se esvaziar. Dessa forma, a resistência à passagem do ar acima do ponto de aeração diminui, aumentando a porção de ar da aeração no tubo de descida, diminuindo o ar disponível para o transporte através da válvula. No caso deste trabalho, isso não foi verificado, como pode ser visto na Figura 4.4. Na Figura 4.6, são comparadas a velocidade do ar desviado para o tubo de descida, que se mostra constante a partir de uma relação velocidade de ar por velocidade de mínima fluidização igual a aproximadamente 0,5, e a velocidade do ar na válvula-L, que se mostra linearmente crescente com a velocidade adimensional. Em função das baixas velocidades de ar desviado, sempre menores que a velocidade mínima fluidização, não houve um esvaziamento do tubo de descida e a alimentação dos sólidos permanece contínua. Os máximos de vazões desviadas para o tubo de descida foram de 12,3% para 1,00 mm, 15,9% para 470 μm e 22,4% para 260 μm , em relação à vazão total do sistema. Nesta figura, foram mostradas apenas as velocidades para as partículas de 470 μm já que para as outras partículas, o comportamento é similar.

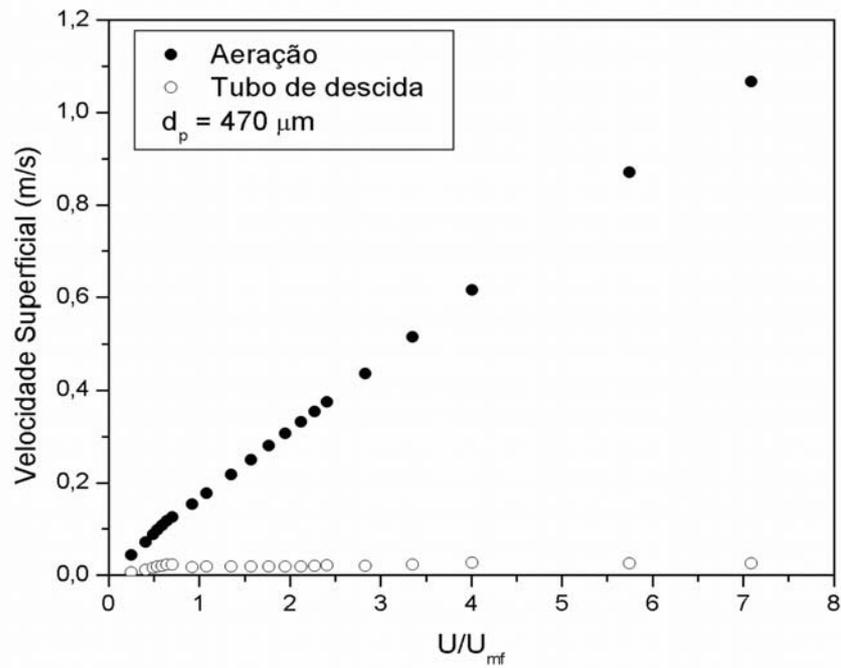


Figura 4.6 Relação entre as velocidades na válvula-L e desviada para o tubo de descida, para partículas de diâmetro de $470 \mu\text{m}$

As correlações desenvolvidas por Geldart e Jones (1991) e Smolders e Baeyens (1995), respectivamente Equações (2.3) e (2.5) para estimar o fluxo mássico de sólidos em válvulas-L foram comparadas aos dados experimentais deste trabalho, mostrados na Figura 4.7.

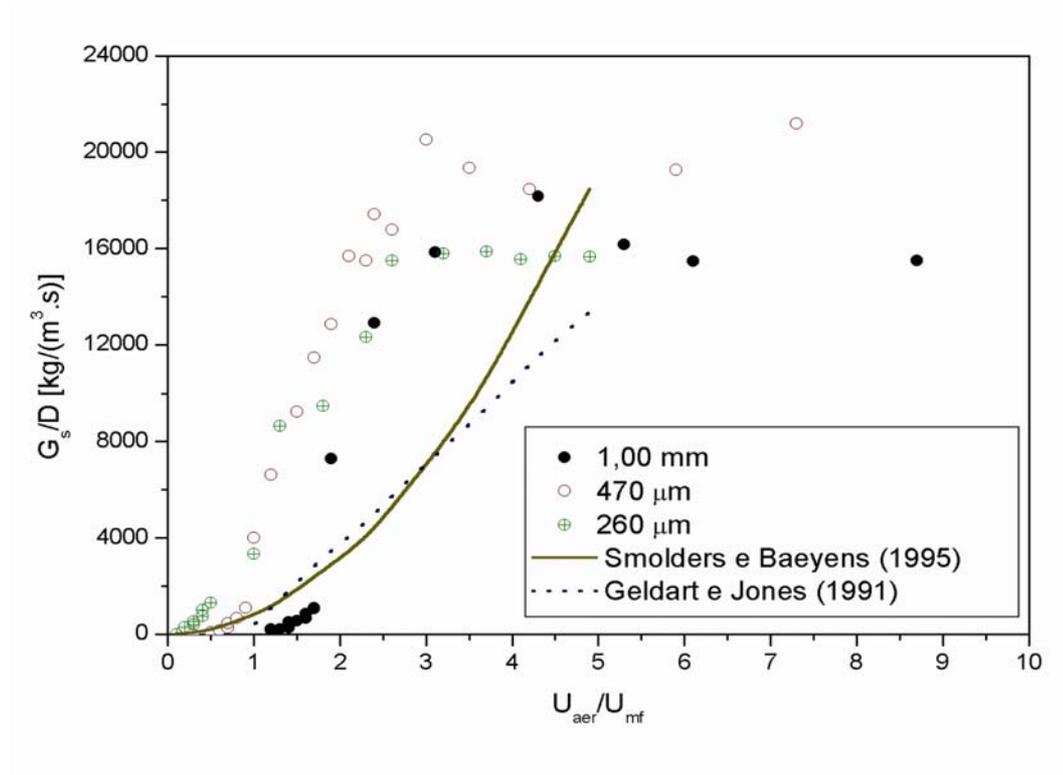


Figura 4.7 G_s/D_t em função de U_{aer}/U_{mf} para os três diâmetros de partículas estudados e comparação com correlações da literatura

As correlações foram obtidas para válvulas-L de diferentes diâmetros internos e para partículas de diferentes diâmetros médios, sendo expressas indiretamente nas equações através das velocidades de mínima fluidização. Pode-se observar, na Figura 4.7, que as correlações fornecidas não se ajustaram aos dados experimentais, que mostraram um aumento do fluxo mássico de sólidos bem mais acentuado que o estimado pelas correlações. Essas discrepâncias eram esperadas por basicamente dois motivos:

- os dados experimentais mostram uma pequena influência do diâmetro médio das partículas nos fluxos mássicos de sólidos em função da velocidade adimensional para a faixa que inclui as vazões de aeração mais baixas, sendo que as correlações indicadas pelas Equações (2.3) e (2.5) só levam em conta essa dependência indiretamente, através de U_{mf} ;

- as correlações foram desenvolvidas para válvulas-L de diâmetros internos maiores que 25 mm e esses dados experimentais foram obtidos para uma válvula de diâmetro interno de 23 mm. Smolders e Baeyens (1995) observaram que a operação das válvulas-L de pequena escala (diâmetros internos em torno de 20 mm) se diferenciava consideravelmente da operação de válvulas de diâmetros maiores. Esses autores observaram que, para válvulas de 20 mm de diâmetro interno, o fluxo mássico de sólidos era consideravelmente maior do que o observado em válvulas de diâmetros maiores, para um mesmo valor de velocidade adimensional. Esse mesmo comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 4.7, comparando os dados experimentais com as curvas dadas pelas correlações.

4.1.4. Diferenças de Pressão na Válvula-L

Os dados de diferença de pressão na válvula-L foram traçados em função do fluxo mássico de sólidos (Figura 4.8). Confirmando a tendência observada anteriormente, no gráfico da Figura 4.2, a diferença de pressão na válvula-L aumenta rapidamente em função da vazão de sólidos até um determinado valor em que essa tendência se suaviza, tendendo a um valor constante. Observa-se que para fluxos mássicos acima de $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, as perdas de carga da válvula para partículas de diâmetro médio de $260 \mu\text{m}$ são inferiores às observadas para os demais diâmetros.

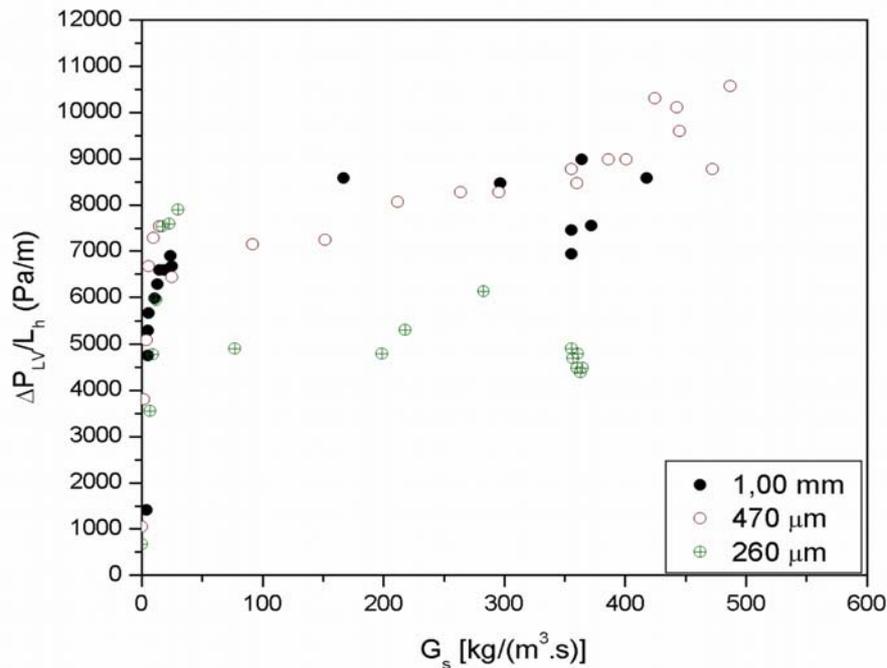


Figura 4.8 Diferenças de pressão na válvula-L por unidade de comprimento em função do fluxo mássico de sólidos para os três diâmetros de partículas

A estimativa da diferença de pressão na válvula também foi estudada por alguns autores (Geldart e Jones, 1991; Smolders e Baeyens, 1995 e Arena et al., 1998) que forneceram correlações empíricas aplicáveis às condições operacionais de seus próprios dados experimentais, sendo representadas respectivamente pelas Equações (2.4), (2.6) e (2.7). Cada uma dessas correlações inclui a influência de determinados parâmetros na estimativa da diferença de pressão, como: o diâmetro da partícula e diâmetro interno do tubo (para as correlações de Geldart e Jones, 1991 e de Arena et al., 1998), entre outros. Na Figura 4.9, estão apresentadas as 3 correlações comparadas aos dados de diferença de pressão para partículas de 1,00 mm. Foram apresentadas as correlações aplicadas aos dados apenas das partículas de 1,00 mm porque para as demais partículas as curvas geradas pelas correlações apresentaram comportamento similares.

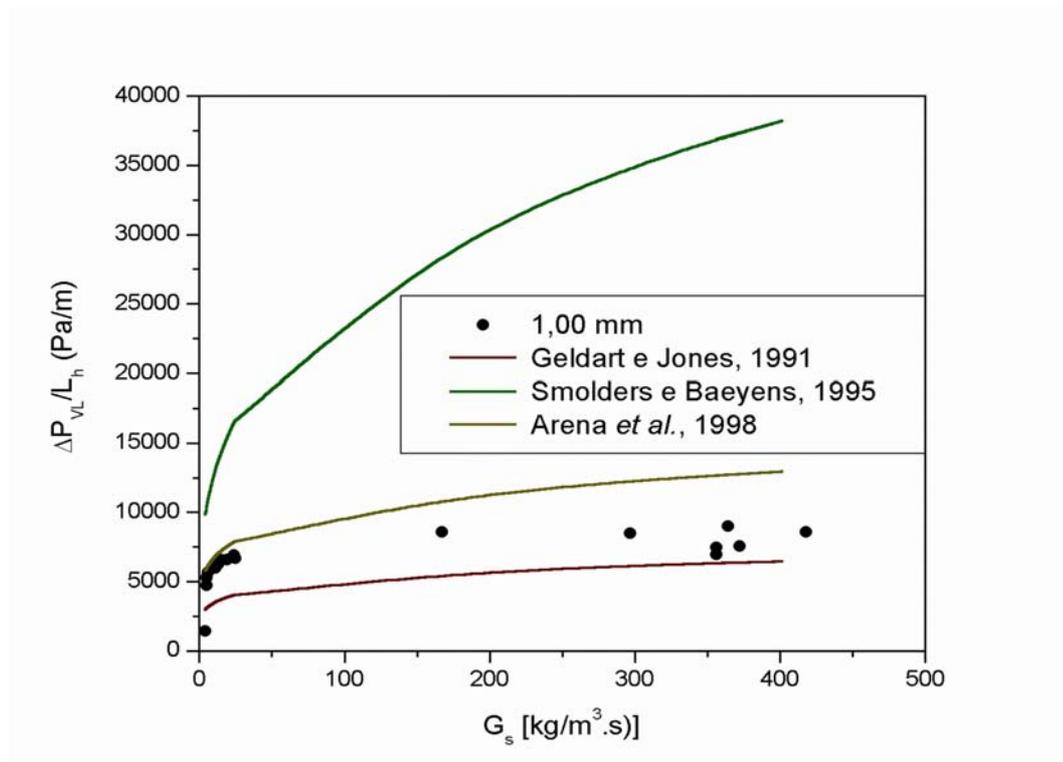


Figura 4.9 Diferenças de pressão na válvula-L por unidade de comprimento em função do fluxo mássico de sólidos para partículas de 1,00 mm de diâmetro comparadas com correlações da literatura

Nenhuma das correlações se ajustou bem aos dados experimentais, apesar de todas mostrarem a mesma tendência dos dados experimentais. Esse resultado é justificado, já que as faixas de validade das equações não incluem as condições de trabalho desenvolvidas nesse estudo. Mesmo assim, os dados se situaram entre as curvas das correlações de Arena et al. (1998) e de Geldart e Jones (1991), sendo que os dados de fluxo mássico de sólidos mais baixos se aproximaram mais da curva da correlação de Arena et al. (1998) e os dados de fluxo mássico mais altos se aproximaram mais da curva da correlação de Geldart e Jones (1991).

4.2. Operação da Válvula-L na Linha de Transporte Pneumático

Para verificar a estabilidade e o comportamento operacional da válvula-L em uma linha típica de aplicação no ponto de vista industrial, foram efetuados testes com o alimentador operando em uma linha de transporte pneumático.

4.2.1. Análise do Desempenho da Válvula-L

Com a válvula-L acoplada ao sistema de transporte pneumático, foram realizados ensaios para as partículas de diâmetros médios de 1,00 mm e de 470 μm mantendo-se fixa uma mesma vazão de ar principal, variando-se apenas a vazão de aeração. As condições experimentais utilizadas para esses ensaios estão mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Condições experimentais para os ensaios do sistema de transporte

<i>Diâmetro de Partículas</i>	<i>Vazão de Aeração (m^3/s)</i>	
	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>
1,00 mm	$2,1 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$
470 μm	$6,4 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Vazão de ar = $0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$ (fixa)		

Os dados de vazão de sólidos obtidos nessas condições em função da vazão de aeração estão mostrados na Figura 4.10. Na faixa de aeração fornecida, a vazão de sólidos aumenta desde 0,0019 kg/s a, aproximadamente, 0,0127 kg/s para partículas de 1,00 mm de diâmetro, de 0,0006 até 0,0499 kg/s para partículas de 470 μm . Nota-se que a tendência de variação da vazão de sólidos com a vazão de aeração se manteve a mesma nas duas condições testadas (válvula-L isolada –

Figura 4.1 e na linha de transporte) para os dois diâmetros de partícula. A figura também confirma que a vazão de aeração mínima requerida aumenta com o aumento do diâmetro de partícula. Durante a operação, o escoamento dos sólidos apresentou, em alguns momentos, instabilidades devido a pequenas variações na vazão de aeração fornecida, porém, no geral, o escoamento era bem comportado.

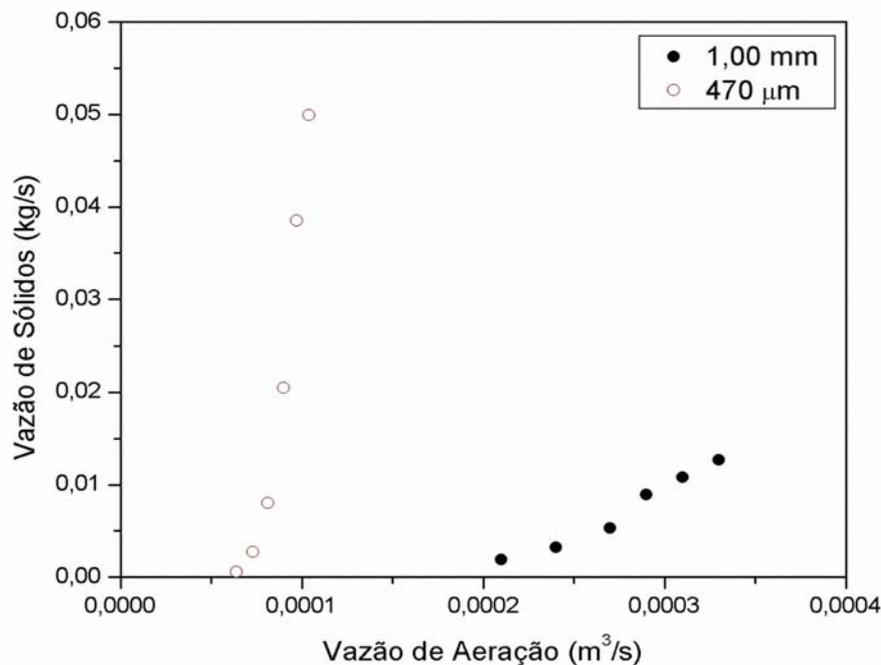


Figura 4.10 Vazão de sólidos em função da vazão de aeração, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 µm. $Q_{ar} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

Os dados de diferença de pressão da válvula-L também foram obtidos e traçados em função da vazão de sólidos para esses dois diâmetros de partículas, apresentados na Figura 4.11. Seguindo a mesma tendência dos dados de caracterização da válvula-L (Figura 4.2), a diferença de pressão na válvula aumenta drasticamente com a vazão de sólidos até que a partir de determinado valor de vazão de sólidos (aproximadamente 0,0055 kg/s para ambos diâmetros de partículas) tende a um valor constante. Como foi mencionado anteriormente,

segundo Arena et al. (1998), a perda de carga na válvula-L será menor para partículas maiores. Porém, o comportamento observado aqui foi o oposto daquele mostrado pelos autores. Convém observar que as condições operacionais em cada um dos casos diferem consideravelmente: a válvula operou em uma faixa de vazão de aeração entre $2,1 \times 10^{-4}$ e $3,3 \times 10^{-4}$ para as partículas de 1,00 mm e entre $6,4 \times 10^{-5}$ e $1,0 \times 10^{-4}$ para as partículas de 470 μm .

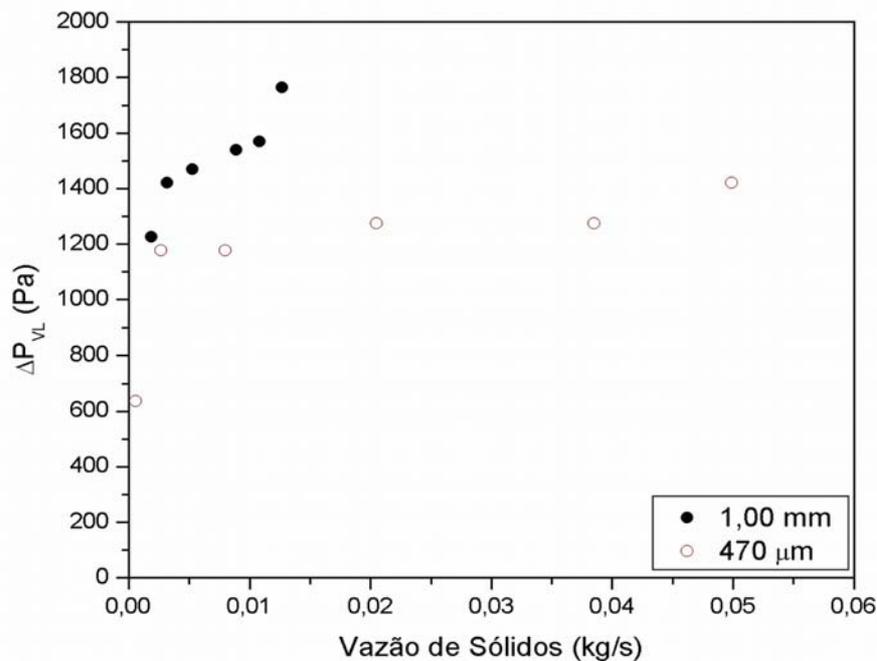


Figura 4.11 Diferença de pressão em função da vazão de sólidos, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm . $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

Efeito da Variação da Vazão de Ar Principal na Vazão de Sólidos

Para completar a análise do desempenho da válvula-L na linha de transporte pneumático, agora para estudar a influência da variação da vazão de ar principal, foram realizados alguns ensaios variando-se a vazão de ar, porém mantendo fixa a vazão de aeração, para as partículas de 470 μm . Os ensaios foram

realizados com vazões de ar variando de $4,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a $5,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, mantendo-se fixa a vazão de aeração a $8,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. A faixa de vazões de ar utilizada, porém, é muito estreita, devido a limitações do equipamento.

Os dados de vazão de sólidos em função da vazão de ar estão mostrados na Figura 4.12. Nota-se que a vazão de sólidos cai bruscamente com o aumento da vazão de ar, indo de 0,0194 a 0,0068 kg/s, em um curto intervalo de vazões de aeração. Esse comportamento indica que existe um valor máximo de vazão de ar, acima do qual a válvula não mais opera, porque a perda de carga na válvula já não é mais suficiente para permitir a alimentação dos sólidos, aumentando o valor da vazão de aeração mínima requerida para o transporte.

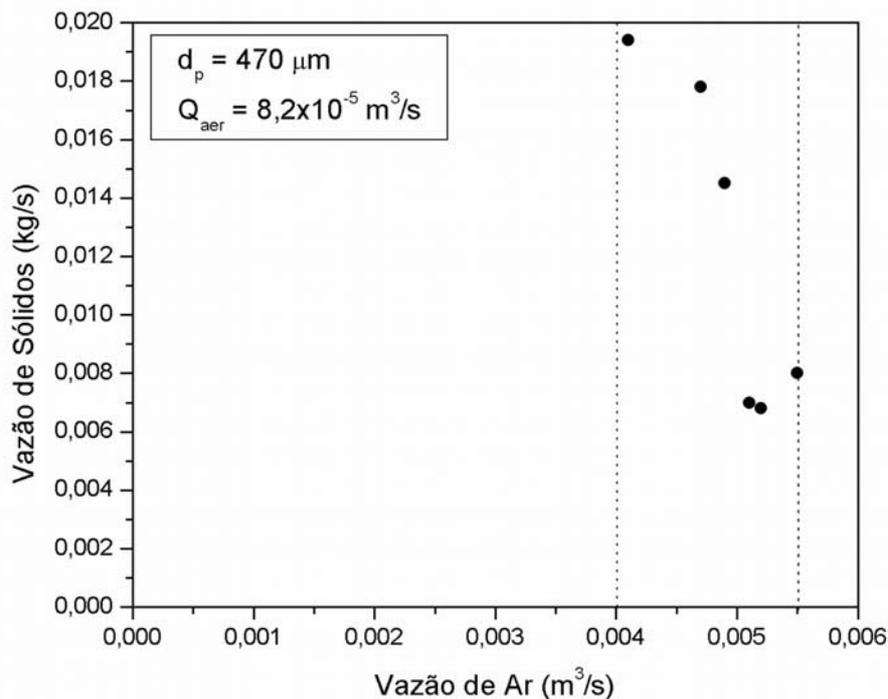


Figura 4.12 Vazão de sólidos versus vazão de ar para as partículas de 470 μm

4.2.2. Balanço de Pressão no Sistema

Uma maneira de analisar o funcionamento da válvula-L no sistema é observar os balanços de pressão ao longo de toda linha. Um típico balanço de pressão ao longo do sistema está mostrado na Figura 4.13, juntamente com as indicações dos “pontos-chave” do equipamento.

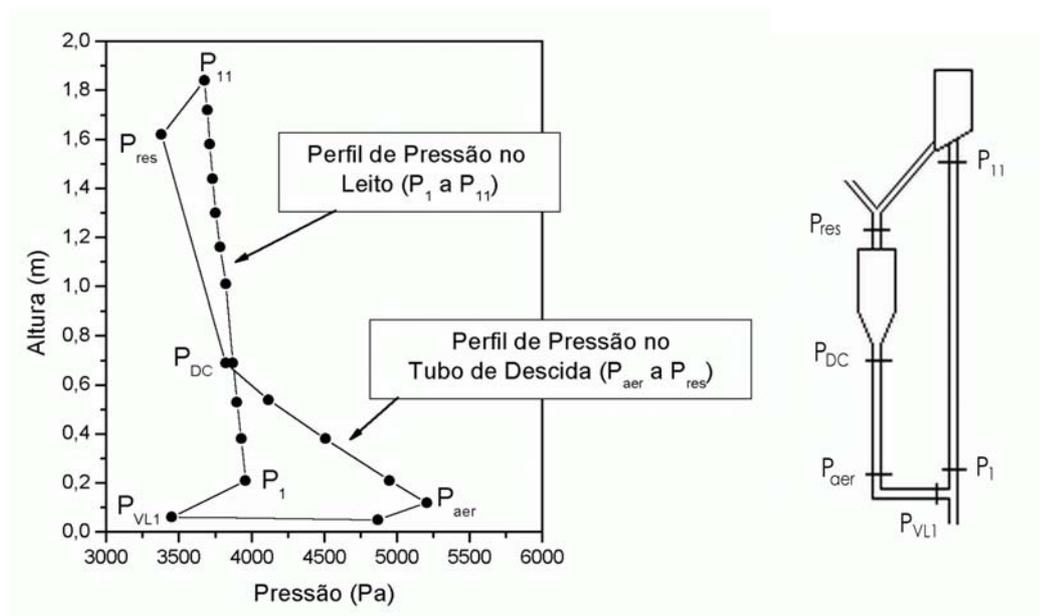


Figura 4.13 Representação do balanço de pressão e seus pontos-chave no equipamento

A Figura 4.14 mostra os perfis de pressão estática ao longo de todo o sistema de transporte, para diferentes vazões de sólidos, para as partículas de 1,00 mm (a) e de 470 μm (b). Os pontos de maior pressão de cada um dos balanços correspondem à tomada de entrada de aeração, estimados através de uma regressão linear dos perfis de pressão experimentais do tubo de descida. Todos os demais pontos de pressão são obtidos experimentalmente. O balanço de pressão em torno do sistema de recirculação de sólidos pode ser representado pela seguinte equação:

$$\Delta P_{DC} = \Delta P_{VL} + \Delta P_{LT} + \Delta P_{SR} + \Delta P_{res} \quad (4.1)$$

onde ΔP_{VL} é a diferença de pressão na válvula-L, ΔP_{LT} é a diferença de pressão no tubo de transporte, ΔP_{SR} é a diferença de pressão no tudo de reciclo, ΔP_{res} é a diferença de pressão no reservatório e ΔP_{DC} é a diferença de pressão no tubo de descida.

De acordo com Arena (1998), esta equação indica que a diferença de pressão no tubo de descida (acima da tomada de aeração) é a parte dependente do balanço de pressão e que deve se igualar à soma das pressões dos componentes restantes do sistema. O balanço de pressão será, juntamente com a vazão de aeração, responsável pelo fornecimento de uma vazão de sólidos específica.

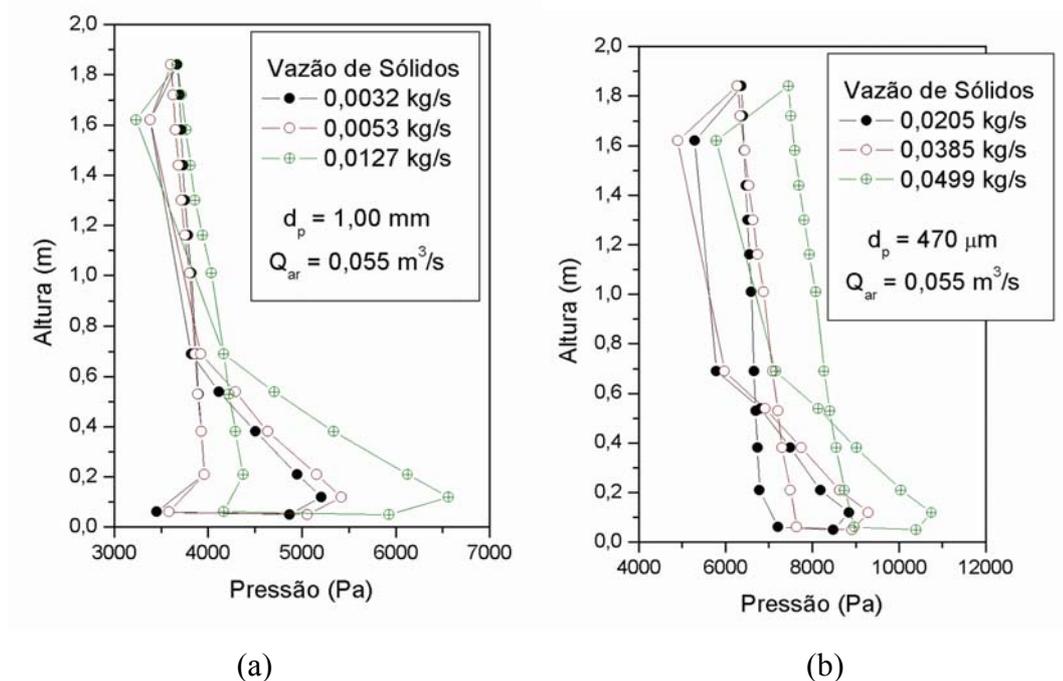


Figura 4.14 Balanços de pressão estática para algumas vazões de sólidos e para os dois diâmetros de partícula

As curvas dos balanços de pressão da Figura 4.14 mostram que quanto maior a vazão de sólidos, resultante de uma maior vazão de aeração, maior será de diferença de pressão na válvula-L e no leito de transporte. Colocando essas constatações em valores de diferença de pressão tem-se a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Diferenças de pressão para o leito de transporte e para a válvula-L para diversas vazões de sólidos e para os dois diâmetros de partícula

<i>Partículas</i>	<i>Vazão de Sólidos (kg/s)</i>	ΔP_{LT} (Pa)	ΔP_{VL} (Pa)
1,00 mm	0,0032	284	1755
	0,0053	353	1830
	0,0127	696	2396
470 μ m	0,0205	412	1640
	0,0385	1225	1649
	0,0499	1294	1778

Os comportamentos qualitativos observados na Figura 4.14 concordam com aqueles apresentados por Arena et al. (1998), com a variação da pressão no tubo de descida aumentando com o aumento da vazão de sólidos, a fim de ajustar o aumento da diferença de pressão nos demais componentes do sistema de recirculação.

Num mesmo gráfico (Figura 4.15), foram traçados dois balanços de pressão para vazões de sólidos próximas e para os dois diâmetros de partícula. Assim como foi observado na Figura 4.11, a diferença de pressão na válvula é maior para as partículas maiores (1,00 mm), contrariando o comportamento observado por Arena et al. (1998). Como as vazões de aeração para cada um dos diâmetros de partículas são muito diversas, de ordens de grandeza diferentes, pode-se inferir que a diferença nas condições operacionais entre os ensaios levou a esse resultado inesperado.

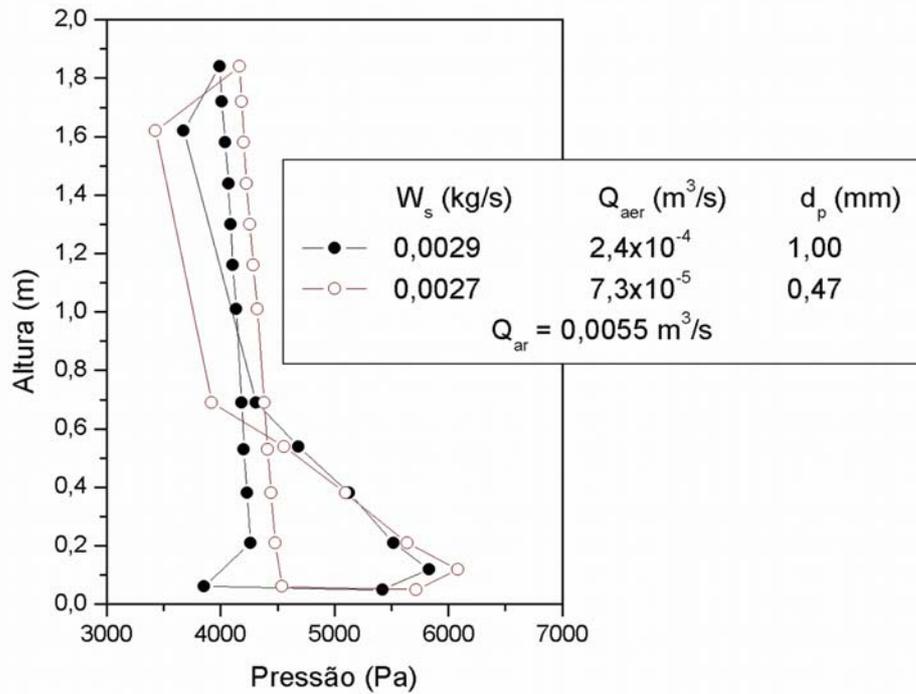


Figura 4.15 Balanços de pressão estática comparando a influência dos dois diâmetros de partícula

Os balanços de pressão para duas vazões de sólidos diferentes, obtidas nos ensaios onde a vazão de ar principal foi variada e a vazão de aeração foi mantida fixa, para as partículas de diâmetro médio de 470 μm estão mostrados na Figura 4.16. Nota-se que a diferença de pressão no tubo de descida praticamente não se altera com a mudança da vazão de sólidos, já que a vazão de aeração é a mesma. Porém, para uma vazão maior, as diferenças de pressão na válvula, no reservatório e no leito pneumático são maiores, sendo compensadas pela diferença de pressão no tubo de reciclo. Pode-se perceber, portanto que para vazões de ar maiores, com a vazão de aeração fixa, a diferença de pressão na válvula será menor, chegando a valores de vazão de sólidos menores também.

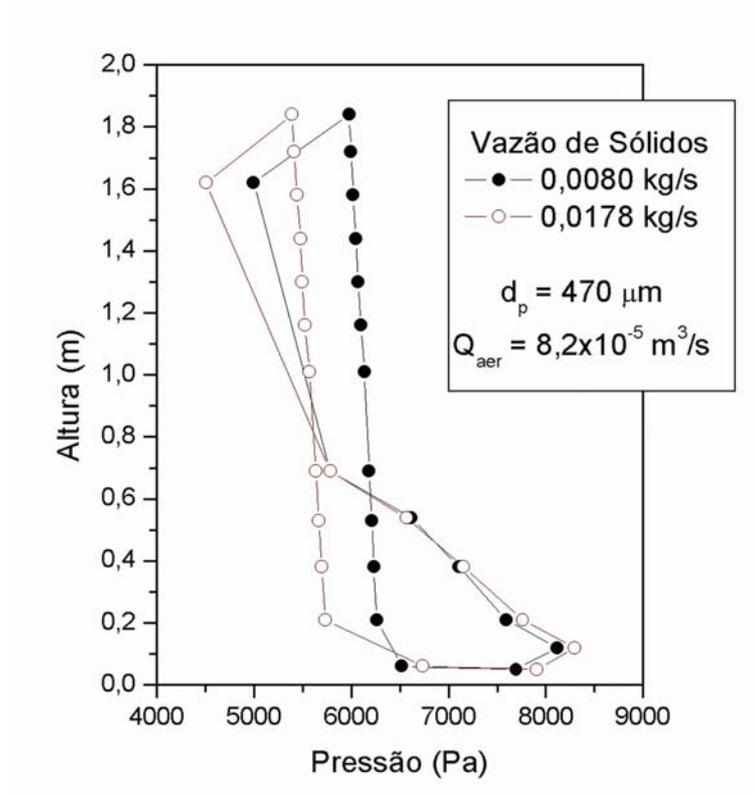
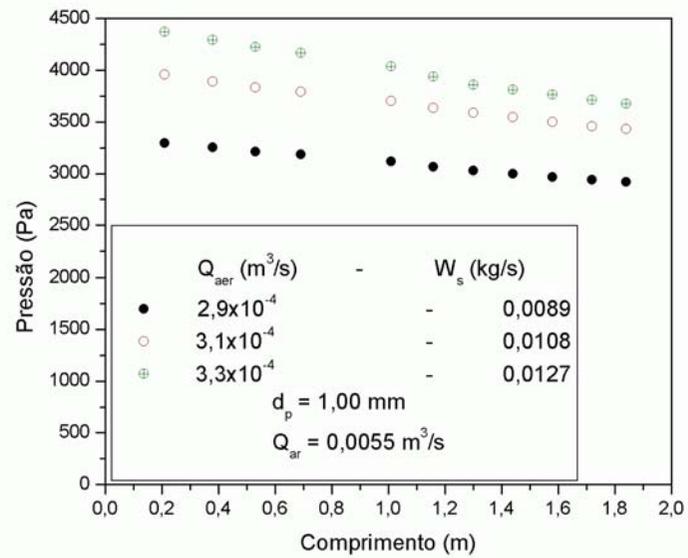


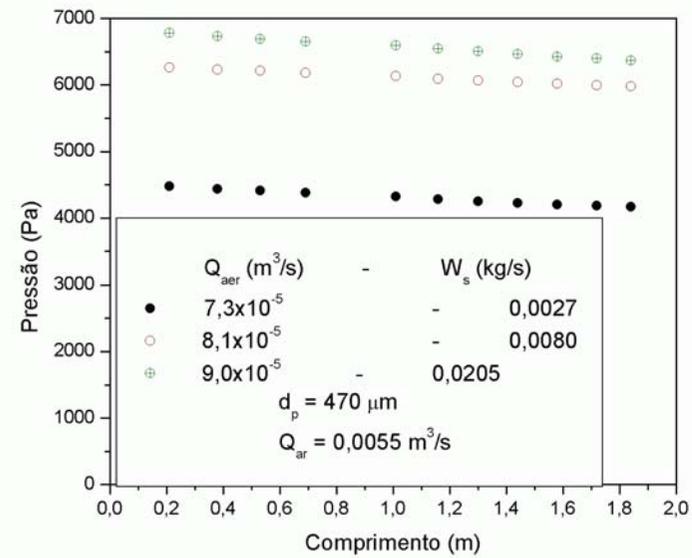
Figura 4.16 Balanços de pressão estática para duas vazões de sólidos diferentes.
 $Q_{\text{aer}} = 8,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.3. Caracterização Fluidodinâmica do Transporte Pneumático

Para caracterizar o comportamento fluidodinâmico do tubo de transporte pneumático operando com a válvula-L, foram obtidos os perfis de pressão ao longo da distância axial no leito, para os dois diâmetros de partículas, mostrados na Figura 4.17. Estão apresentados os perfis de pressão para as diferentes vazões de aeração, que sugere diferentes vazões de sólidos, de acordo com o comportamento mostrado anteriormente. As pressões decrescem conforme a distância axial aumenta e mostram uma dependência linear com a distância ao longo de todo o comprimento do tubo de transporte.



(a)



(b)

Figura 4.17 Perfis de pressão no leito pneumático para os dois diâmetros de partículas

Essa dependência linear é característica do transporte pneumático em fase diluída para condições de escoamento plenamente desenvolvido (Narimatsu, 2000), indicando que o comprimento de entrada do leito não pode ser detectado experimentalmente através destes perfis de pressão. Foram realizados ajustes lineares para cada um dos perfis a fim de se obter os gradientes de pressão no leito pneumático. Todos os pontos de cada perfil foram considerados para os ajustes lineares e foram obtidos coeficientes de correlação acima de 0,99 para todas as condições. Esses resultados indicam que o alimentador de sólidos operou de forma adequada e satisfatória, já que permitiu um transporte pneumático estável para uma faixa de vazões de sólidos ampla.

A Figura 4.18 apresenta os gradientes de pressão obtidos pelas tangentes dos ajustes lineares dos perfis de pressão em função da vazão de sólidos, para as partículas de 1,00 mm e de 470 μm .

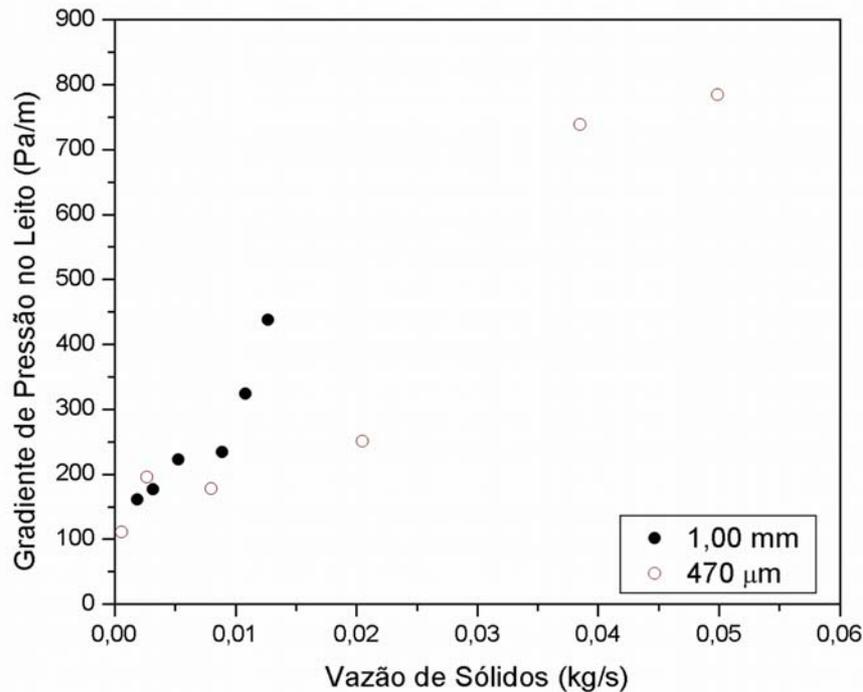


Figura 4.18 Gradientes de pressão no leito pneumático em função da vazão de sólidos para os dois diâmetros de partícula. $Q_{ar} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

Os gradientes de pressão variam entre 150 e 450 Pa/m para as partículas de 1,00 mm de diâmetro e entre 100 e 800 Pa/m para as partículas de 470 μm, nas condições estudadas. A uma vazão de ar principal constante, pode-se observar que o gradiente de pressão aumenta conforme a vazão de sólidos também aumenta, devido ao aumento de sua força peso.

Foram realizadas as estimativas da porosidade média no leito de transporte através do método mostrado no item 3.3.4. A Figura 4.19 apresenta essas porosidades médias estimadas em função da vazão de sólidos. Para as partículas de 1,00 mm de diâmetro, as porosidades se apresentaram todas acima de 0,985, enquanto que, para as partículas de 470 μm de diâmetro, estas se mantiveram acima de 0,970.

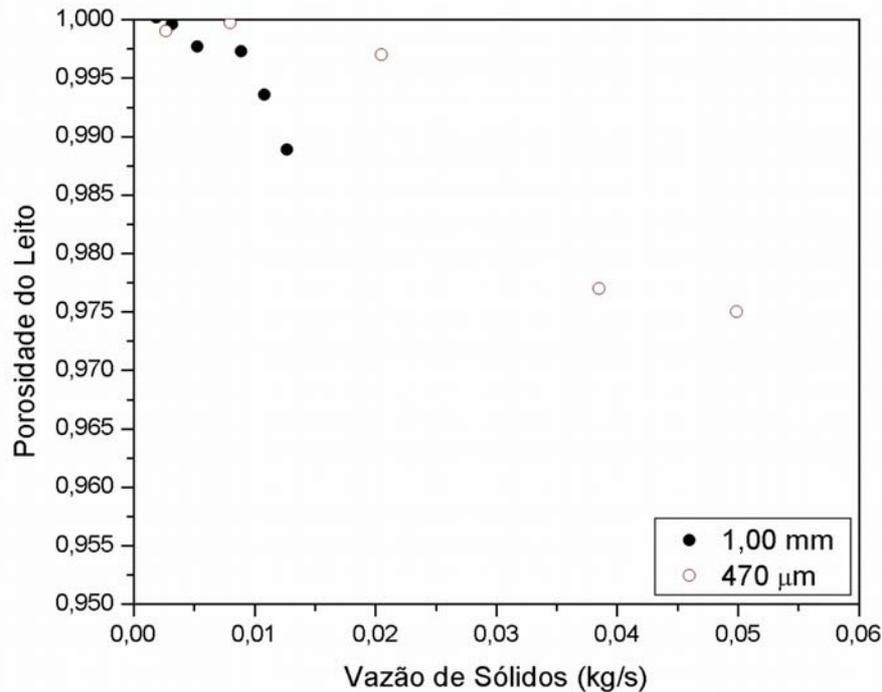


Figura 4.19 Porosidade no leito pneumático em função da vazão de sólidos para os dois diâmetros de partícula. $Q_{ar} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

Estes valores indicam um típico regime de escoamento diluído, como já havia sido previsto através dos perfis de pressão no leito. Mais uma vez, esses resultados indicam a boa operação da válvula-L na linha de transporte pneumático, oferecendo um transporte estável em regime diluído, mesmo com altas vazões de sólidos, além de um comprimento de região de entrada bastante reduzido.

4.2.4. Comparação entre o Desempenho da Válvula-L isolada e na Linha de Transporte Pneumático

Os dados obtidos nos ensaios para a válvula-L isolada e para a válvula-L na linha de transporte pneumático foram comparados para completar a análise do

desempenho da válvula aplicada ao sistema. A Figura 4.20 apresenta os dados de vazão de sólidos em função da vazão de aeração para 1,00 mm e para 470 μm .

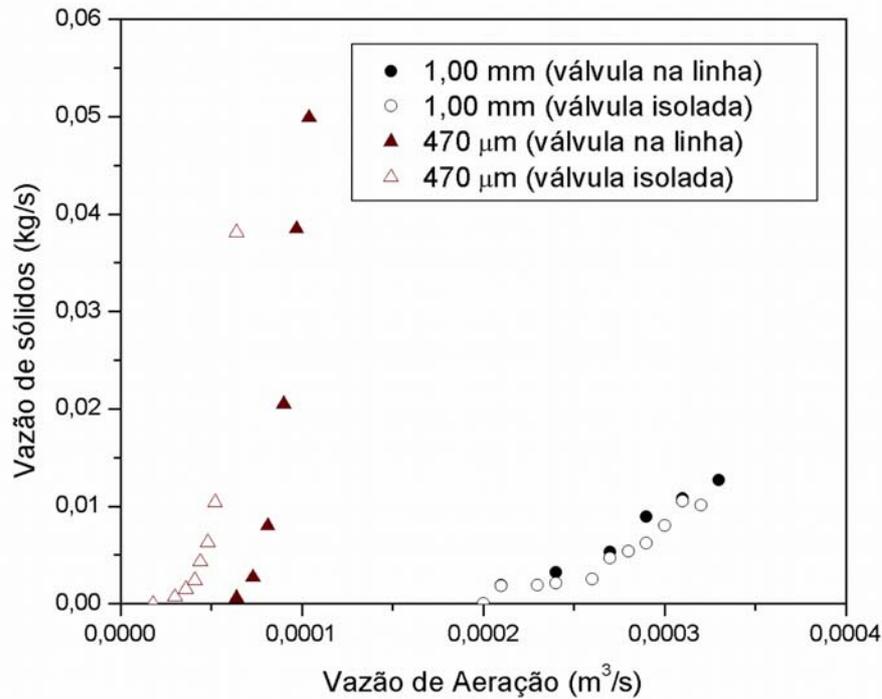


Figura 4.20 Vazão de sólidos em função da vazão de aeração, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm , nas duas condições. $Q_{\text{ar}} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

No caso dos dados para partículas de 1,00 mm de diâmetro, os dados praticamente se sobrepuseram, indicando que para essas condições a performance da válvula-L não é afetada pela injeção do ar principal no sistema. Já para as partículas de 470 μm , apesar da tendência ser parecida, os dados para a válvula-L integrada ao sistema mostram que é necessária uma vazão de aeração maior para o início do transporte dos sólidos. Segundo os trabalhos da literatura sobre válvula-L, a vazão de sólidos na válvula depende não apenas da taxa de aeração, mas também do balanço de pressão ao longo do sistema. Com um aumento na vazão de aeração, o sistema ajusta o balanço de pressão de modo a fornecer a força

motriz necessária para manter o escoamento, fazendo com que a vazão de sólidos aumente. Para as partículas de diâmetro médio de 470 μm , o deslocamento da curva de fluxo de sólidos em função da velocidade adimensional se deve provavelmente ao fato de que para a condição de razão entre a velocidade de aeração pela velocidade do ar principal, $U_{\text{aer}}/U_{\text{ar}}$ igual a 0,3% (que utilizaria a U_{aer} igual à da válvula operando isoladamente), o valor de U_{aer} não atinge o valor mínimo requerido para fornecer a força motriz necessária para o início do transporte. Já, para uma relação maior (igual a 1,2%), o transporte pôde ser realizado. A relação $U_{\text{aer}}/U_{\text{ar}}$ mínima para o trabalho da válvula na linha de transporte seria dada pela relação que utiliza a velocidade de aeração mínima requerida para o transporte para a válvula trabalhando isoladamente, para cada diâmetro de partícula. No caso das partículas de 1,00 mm, durante a operação da válvula na linha, a relação $U_{\text{aer}}/U_{\text{ar}}$ se igualou a esse valor mínimo, fornecendo as curvas de vazões de sólidos sobrepostas para as duas condições.

Os dados de diferença de pressão da válvula-L também foram comparados para as duas condições operacionais, como é mostrado na Figura 4.21. Comparando os dois conjuntos de dados para partículas de 1,00 mm, nota-se que, para uma mesma vazão de sólidos, a diferença de pressão para a válvula no sistema de transporte é maior que para a mesma operando sozinha. Quando a válvula opera sozinha, apenas três componentes contribuem para o balanço de pressão (a válvula-L, o reservatório de sólidos e o tubo de descida). Ao ser operada no sistema, a diferença de pressão na válvula aumenta para compensar o aumento na pressão total do sistema, que então irá contar com mais dois

componentes: o leito pneumático e a linha de reciclo. Dessa maneira, é possível para a válvula fornecer a mesma vazão de sólidos para essa faixa de operação.

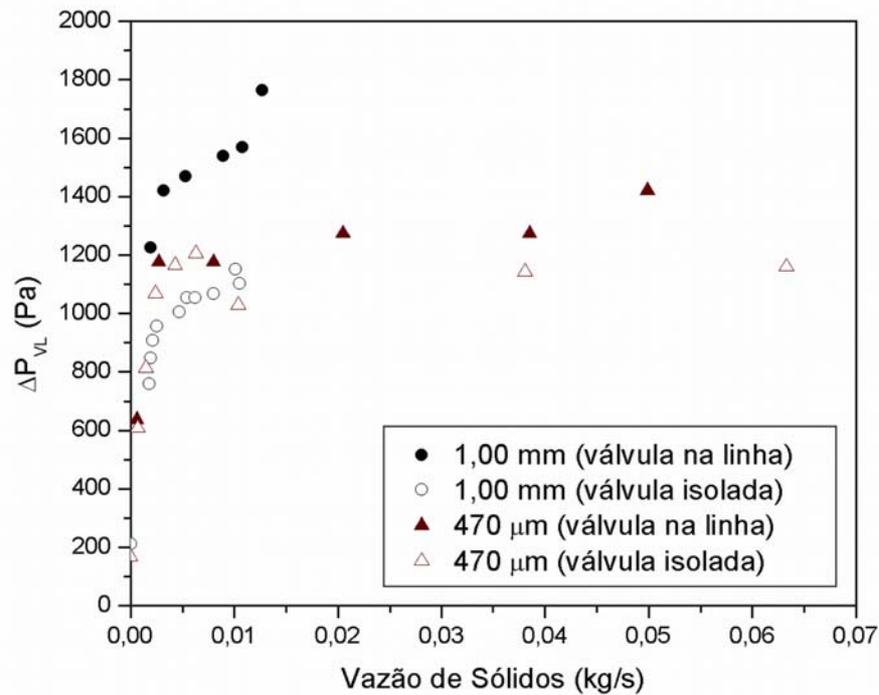


Figura 4.21 Diferença de pressão em função da vazão de sólidos, para partículas de diâmetro de 1,00 mm e 470 μm , nas duas condições. $Q_{ar} = 0,0055 \text{ m}^3/\text{s}$

As diferenças de pressão na válvula para os dados de 470 μm , porém, se mostraram praticamente iguais nos dois casos. Como a vazão de sólidos se mostrou diferente para as duas configurações, pode-se deduzir que o sistema de compensação no balanço de pressão não chegou a afetar a diferença de pressão na válvula-L.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os dados obtidos e as análises dos resultados apresentados no capítulo anterior possibilitaram as conclusões que se seguem.

- Foram identificados três padrões de escoamento dependendo da faixa de vazão de sólidos que escoam através da válvula-L. Para vazões de sólidos baixas, os sólidos se mantêm estagnados na parte inferior da válvula e escoando na porção superior. Para vazões de sólidos intermediárias, a região estagnada diminui, surgindo uma corrente de sólidos escoando na forma de ondas, causando algumas oscilações na descarga de sólidos. Já para altas vazões de sólidos, a região estagnada praticamente desaparece, surgindo um escoamento na forma de pulsos, causando grandes oscilações na descarga de sólidos. As oscilações podem ser observadas visualmente.
- Na etapa de caracterização da válvula-L, a influência do diâmetro médio de partícula na vazão mínima de aeração foi constatada. A vazão de aeração requerida aumenta com o aumento do diâmetro de partícula.
- O fluxo de sólidos aumenta com o aumento da velocidade adimensional (U_{aer}/U_{mf}) até que, a partir do valor de U_{aer}/U_{mf} igual a 2,5, o fluxo atinge um patamar estável, abaixo do fluxo máximo oferecido pelo reservatório, limitando o escoamento.
- A perda de carga na válvula aumenta com o fluxo de sólidos até que a tendência se suaviza e a perda de carga se estabiliza em aproximadamente um valor estável. A perda de carga das partículas de 260 μm se apresentou

menor que a dos demais, contrariando os resultados obtidos nos trabalhos da literatura para válvulas de diâmetro acima de 25 mm.

- Na etapa de operação da válvula-L na linha de transporte pneumático, as tendências apresentadas na etapa de caracterização da válvula foram as mesmas para os fluxos de sólidos e para as perdas de carga na válvula, quando a vazão de ar principal era fixada em um valor constante. Para uma vazão de aeração fixa, o fluxo de sólidos se mostrou descendente com o aumento da vazão de ar principal.
- A comparação entre o desempenho da válvula nas duas etapas mostrou que o balanço de pressão no sistema irá determinar a razão entre a velocidade de aeração e a velocidade do ar no sistema que fornece a vazão de aeração mínima requerida para o transporte. Para as partículas de 1,00 mm, as vazões de aeração mínimas se apresentaram bem próximas entre si, já para as partículas de 470 μm , a vazão de aeração mínima para a válvula na linha de transporte se mostrou maior que para a válvula isolada.
- Válvulas-L com este diâmetro (23 mm) operam de forma mais eficiente para partículas de menor diâmetro, já que é possível transportar elevados valores de G_s com menores relações $U_{\text{aer}}/U_{\text{mf}}$, com perdas de carga equivalentes em condições similares.

Diante dos resultados obtidos nos ensaios com o alimentador de sólidos tipo válvula-L operando isoladamente e operando na linha de transporte pneumático, sugere-se para futuros trabalhos:

-
- realização de ensaios utilizando partículas de esfericidade diferente de 1, como, por exemplo, areias, para avaliar o efeito da esfericidade no desempenho operacional da válvula-L;
 - realização de ensaios utilizando partículas de outras faixas do diagrama de Geldart, como materiais coesivos para analisar o desempenho da válvula-L com diferentes tipos de materiais;
 - formulação de modelagem matemática na região de aceleração da linha de transporte pneumático influenciada por esse tipo específico de alimentador de sólidos;
 - estudo com válvula-L em linha de transporte pneumático em escala piloto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENA, U., LANGELI, C. B., CAMMAROTA, A.; “L-Valve Behaviour with Solids of Different Size and Density”, Powder Technology, Vol. 98, pp. 231-240, 1998.
- BI, H. T., ISSANGYA, A. S., GRACE, J. R.; “A Novel Method for Determination of Choking Velocities”, Powder Technology, Vol. 97, pp. 59-62, 1998.
- BOVO, T. F., FERREIRA, M.C.; “Investigação Experimental da Região de Entrada em um Leito Pneumático Vertical com Alimentador Tipo Parafuso Helicoidal”, Anais do 30º ENEMP, São Carlos – SP, 2002.
- CAPES, C. E., NAKAMURA, K.; “Vertical Pneumatic Conveying: an Experimental Study with Particles in the Intermediate and Turbulent Flow Regimes”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 51, pp. 31-38, 1973.
- CHONG, Y. O., LEUNG, L. S.; “Comparison of Choking Velocity Correlations in Vertical Pneumatic Conveying”, Powder Technology, Vol. 47, pp. 43-50, 1986.
- COSTA, I. A., “Contribuições ao Estudo do Escoamento Sólido-Fluido nos Regimes Denso e Diluído em um Leito de Transporte Pneumático Vertical”, Tese de Doutorado, DEQ/UFSCar, São Carlos, 2001.
- COSTA, I. A., FERREIRA, M. C., FREIRE, J. T.; “Estudo da Fluidodinâmica de um Leito de Transporte Pneumático Vertical com Alimentação Tipo Jorro: Influência do Diâmetro das Partículas”, Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, Vol. 21, pp. 157-165, 2002.
- GELDART, D., JONES, P.; “The Behaviour of L-valves with Granular Powders”, Powder Technology, Vol. 67, pp. 163-174, 1991.
- GOMIDE, R.; “Operações Unitárias – Operações com Sistemas Sólidos Granulares”, 1º Vol., Edição do Autor, São Paulo, 1983.
- KLINZING, G. E., MARCUS, R. D., LEUNG, L. S., RISK, F.; “Pneumatic Conveying of Solids: a Theoretical and Practical Approach”, 2nd edition, Powder Technology Series, Chapman & Hall, 1997.
- KNOWLTON, T. M., HIRSAN, I.; “L-valves Characterized for Solid Flow”, Hydrocarbon Processing, Vol.57, pp. 149-156, 1978.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O.; “Fluidization Engineering”, 2nd edition, Butterworth Heinemann, 1991.

- MARCUS, R. D., LEUNG, L. S., KLINZING, G. E., RISK, F.; “Pneumatic Conveying of Solids: a Theoretical and Practical Approach”, Powder Technology Series, St Edmundsbury Press, 1990.
- MASSARANI, G.; “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, 2ª. edição, E-Papers Serviços Editoriais, Rio de Janeiro, 2002.
- NARIMATSU, C. P.; “Transporte Pneumático Vertical em Fase Densa e Diluída – Influência da Densidade e do Diâmetro de Partículas no Comportamento Fluidodinâmico”, Dissertação de Mestrado, DEQ/UFSCar, São Carlos, 2000.
- RHODES, M. J., LAUSSMANN, P.; “A Study of the Pressure Balance Around the Loop of a Circulating Fluidized Bed”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 70, pp. 625-630, 1992.
- RHODES, M. J.; “Pneumatic Conveying”, Principles of Powder Technology, ed. M. J. Rhodes, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 143-170, 1990.
- SILVA, M. G. C., PÉCORÁ, A. A. B., GOLDSTEIN JR., L., LOMBARDI, G., PAGLIUSO, J. D.; “Estudo do Desempenho da Válvula L em Um Leito Fluidizado Circulante”, Anais do X COBEQ, pp. 393-398, São Paulo, 1994.
- SMOLDERS, K., BAEYENS, J.; “The Operation of L-valves to Control Standpipe Flow”, Advanced Powder Technology, Vol. 6, pp. 163-176, 1995.
- TONG, H., LI, H., LU, X., ZHENG, Q.; “Hydrodynamic Modeling of the L-valve”, Powder Technology, Vol. 129, pp. 8-14, 2003.
- YANG, W. C., KNOWLTON, T. M.; “L-valve Equations”, Powder Technology, Vol. 77, pp. 49-54, 1993.