

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

Cibele Souza Lopes

**ESTUDO DA ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS EM
SISTEMAS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO**

SÃO CARLOS – SP

2011

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

ESTUDO DA ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS EM SISTEMAS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Cibele Souza Lopes

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire
Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira

SÃO CARLOS – SP

2011

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

L864ea

Lopes, Cibele Souza.

Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático / Cibele Souza Lopes. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

127 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Engenharia química - fenômenos de transporte. 2. Transporte por tubo pneumático. 3. Fluidodinâmica. 4. Alimentador de sólidos. 5. Alimentadores não-mecânicos. I. Título.

CDD: 660.2842 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **CIBELE SOUZA LOPES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 03 DE MARÇO DE 2011.

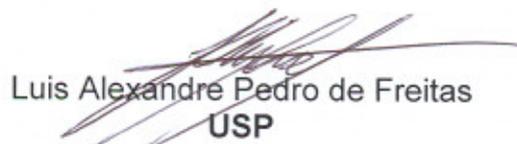
BANCA EXAMINADORA:



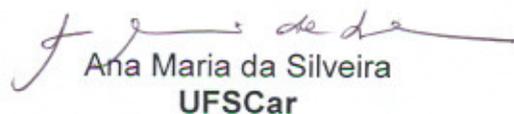
José Teixeira Freire
Orientador / UFSCar



João Cláudio Thoméo
IBILCE



Luis Alexandre Pedro de Freitas
USP



Ana Maria da Silveira
UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Dermeval José Mazzini Sartori
UFSCar

“Que a força do medo que tenho
Não me impeça de ver o que anseio.
Que a morte de tudo em que acredito
Não me tape os ouvidos e a boca.
Porque metade de mim é o que eu grito
Mas a outra metade é silêncio.

Que as palavras que eu falo
Não sejam ouvidas como prece e nem repetidas com fervor.
Apenas respeitadas.
Como a única coisa que resta a um homem
Inundado de sentimentos.
Porque metade de mim é o que ouço
Mas a outra metade é o que calo...

Que essa minha vontade de ir embora
Se transforme na calma e na paz que eu mereço.
Que essa tensão que me corrói por dentro
Seja um dia recompensada.
Porque metade de mim é o que eu penso
Mas a outra metade é um vulcão.

E que a minha loucura seja perdoada.
Porque metade de mim é amor
E a outra metade também.”

*Este trabalho é dedicado ao meu amor,
Robson Leandro Silva.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me presentear com a vida e com oportunidades de aperfeiçoamento, como este doutorado. E ainda, por colocar nesta minha jornada pessoas muito especiais, que foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui, e pelas quais tenho eterna gratidão.

Ao meu marido Robson, por todo o auxílio na construção deste trabalho, seja ajudando nos experimentos, elaborando todos esses desenhos “chiquérrimos” em AutoCAD, ou mesmo me fazendo companhia na Federal em muitos fins de semana. Obrigada por ser meu amigo, companheiro e grande amor da minha vida.

Agradeço também a minha Mãe, meu Pai e minhas irmãs, por estarem em todos os momentos da minha vida, me dando apoio e amor incondicional.

Ao professor Freire, que não limitou meu aprendizado ao conteúdo desta tese, indo muito além e me passando preciosas lições de vida. E por ser ainda, junto com a professora Maria do Carmo, pilares deste trabalho através de uma orientação inteligente, criativa e cooperativa, sempre com muita dedicação, paciência, respeito e ternura.

Agradeço ainda aos demais professores do Centro de Secagem, que deram diferentes contribuições que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. E também ao Oscar, e toda sua paciência e prontidão nos inúmeros consertos, montagens e desmontagens, além da companhia e amizade.

Minha gratidão ao Thiago, que trouxe novos desafios quando começou a “dividir” o leito pneumático, além de ser um amigo e colega para discussões e trocas de ideias. Por fim, deixo aqui meu obrigado a todos os amigos do Centro de Secagem e demais amigos que fiz em São Carlos, que com suas amizades foram importantes no dia-a-dia, afastando qualquer tristeza, desânimo e solidão.

RESUMO

Dentre as partes que compõem um leito pneumático, a alimentação de sólidos é uma das áreas mais importantes, devido à complexidade fluidodinâmica dessa região, além de afetar a estabilidade operacional, viabilidade técnica e econômica e eficiência do sistema.

O presente estudo tem o objetivo de realizar uma avaliação experimental da fluidodinâmica de configurações de alimentação para diferentes condições operacionais, formadas a partir de combinações de alimentadores não-mecânicos e bocais restritivos, considerando a influência em todo o leito. Os alimentadores avaliados foram o tubo inclinado e a válvula-L, com bocais restritivos dos tipos redutor e Venturi. Além desses, foram avaliados o alimentador tipo jorro e a alimentação horizontal, que já contém em sua configuração original, regiões de constrição da passagem do escoamento.

A análise e comparação dos dados fluidodinâmicos obtidos para as configurações de alimentação consideradas num “loop” pneumático com tubulação de diâmetro interno igual a 53,4 mm, quando este transporta esferas de vidro com diâmetro médio de 1 mm, mostraram uma relação entre as condições operacionais e o tipo de alimentação, produzindo intervalos de velocidades de ar de transporte e vazões de sólidos alcançadas característicos para cada caso. Esse estudo insere ainda a ideia da utilização de bocais restritivos combinados com alimentadores de sólidos não mecânicos, a fim de aumentar a vazão de sólidos transportada no sistema. Até então, o destaque dado aos bocais limitava-se a estabilidade de operação.

ABSTRACT

One of the most important parts in a pneumatic conveying is the solids feeding system due its complexity fluid dynamic, besides affecting the operational stability, economical and technical feasibility and system efficiency.

The purpose of this wok was to carry out a experimental study of fluid dynamic of feeding configuration for different operational conditions, made of non-mechanicals devices and reduction nozzle combinations, considering the influence in all pneumatic conveying system. The feeders applied were inclined pipe and L-valve, with and without reduction nozzle. Moreover, the spouted bed and the horizontal feeders were analyzed as well, which on their original design has reduction area for the flow.

An analyses and a comparison of the fluid dynamic data obtained for feeding configurations in a pneumatic “loop” with 53,4 mm of internal diameter tube and transporting 1 mm glass spheres showed a relationship between the operational conditions and the type of feeder, resulting in air velocity and solid flow rate characteristics for each case . This study also gives the idea to apply reductions nozzles combined with non-mechanicals solid feeder in order to increase the solid flow rate. Up to the moment, the reduction nozzle was indicated just to get better the operation stability.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xvi
NOMENCLATURA.....	xvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – Formas de operação de sistemas bifásicos.....	3
2.2 – Transporte pneumático.....	7
2.3 – Estrutura física de um transportador pneumático.....	12
2.3.1 – Alimentação de gás.....	13
2.3.2 – Transporte.....	14
2.3.3 – Separação gás-sólido.....	19
2.4 – Alimentação em sistemas de transporte pneumático.....	20
2.4.1 – Alimentador tubo inclinado.....	27
2.4.2 – Alimentador válvula-L.....	29
2.4.3 – Alimentador leito de jorro.....	31
2.4.4 – Alimentador horizontal.....	34
2.5 – Bocais de entrada em sistemas de transporte pneumático....	36

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 – Equipamento.....	41
3.2 – Materiais.....	50
3.3 – Técnicas de medidas.....	50
3.3.1 – Velocidade do ar de transporte.....	51
3.3.2 – Ajuste de vazão de sólidos dos alimentadores.....	55
3.3.3 – Vazão mássica de sólidos.....	58
3.3.4 – Pressão estática.....	60
3.4 – Procedimentos experimentais.....	65
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1 – Fluidodinâmica do “loop” pneumático com alimentador tubo inclinado.....	70
4.2 – Tipo de alimentador de sólidos.....	80
4.3 – Utilização de bocais restritivos.....	87
4.4 – Formas de inserção dos sólidos.....	97
4.5 – Análise global das configurações de alimentação.....	103
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	106
5.1 – Conclusões.....	106
5.2 – Sugestões.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Formas de contato fluido-partícula em função da velocidade superficial do gás (Grace, 1986; Gidaspow, 1993).....	4
Figura 2.2 – Diagrama de queda de pressão no leito em função da velocidade do gás (Marcus <i>et al.</i> , 1990).	9
Figura 2.3 – Desenvolvimento das estruturas de escoamento num transportador pneumático vertical extraído de Lopes <i>et al.</i> (2009), a partir da classificação de Leung (1980).....	11
Figura 2.4 – Diagrama de um sistema de transporte pneumático adaptado de Marcus <i>et al.</i> , 1990.....	12
Figura 2.5 – Escoamento gás-sólido através de uma curva (Akilli <i>et al.</i> , 2001).....	15
Figura 2.6 – Pressão estática ao longo de um transportador pneumático (Silva, 1997).....	18
Figura 2.7 – Alimentador tubo inclinado.....	28
Figura 2.8 – Alimentador válvula-L.....	29
Figura 2.9 – Alimentador tipo leito de jorro (Ferreira e Freire, 2009).....	31
Figura 2.10 – Queda de pressão em função da velocidade do ar (Sousa, 2009).....	32
Figura 2.11 – Vazões de sólidos em função da velocidade adimensional do ar (Ferreira, 1996). Sólidos: esferas de vidro de 1,10 mm ($U_t = 7$ m/s). (a) Sem bocal; (b) Com bocal.....	33
Figura 2.12 – Decomposição da força peso de uma partícula dentro do alimentador tubo inclinado.....	35
Figura 2.13 – Leito pneumático vertical com alimentação horizontal utilizado no estudo de Rosa <i>et al.</i> (2003).(1) - ciclone; (2) e (4) - cotovelo 90°; (3) - riser;(5) alimentador; (6) silo alimentador; (7) Venturi; (8) ventilador.....	36
Figura 2.14 – Bocais de entrada avaliados por Olazar <i>et al.</i> (1992), para um leito de jorro.....	37

Figura 2.15 – Bocais de entrada avaliados por Rosa e Freire (2007), para um leito de jorro.....	38
Figura 2.16 – Bocal redutor utilizado por Silva <i>et al.</i> (1996) e Ferreira (1996).....	39
Figura 2.17 – Bocais avaliados por Lopes (2007).....	40
Figura 3.1 – “Loop” pneumático. Medidas em <i>mm</i>	42
Figura 3.2 – Alimentadores externos. (A) Tubo inclinado; (B) Válvula-L. Medidas em <i>mm</i>	44
Figura 3.3 – Bocais de entrada. (A) Bocal sem restrição; (B) Bocal redutor; (C) Bocal Venturi. Vista corte longitudinal. Medidas em <i>mm</i>	46
Figura 3.4 – Dimensões básicas de um tubo Venturi. (Delmée, 1981).....	47
Figura 3.5 – Alimentador leito de jorro. Medidas em <i>mm</i>	48
Figura 3.6 – Alimentação horizontal. Medidas em <i>mm</i>	49
Figura 3.7 – Sistema de alimentação de ar de transporte.....	52
Figura 3.8 – Vazão de ar alimentado ao sistema ao longo do tempo.....	53
Figura 3.9 – Valores pré-definidos para a velocidade do ar de transporte.....	53
Figura 3.10 – Válvula guilhotina manual para o tubo inclinado. (A) Válvula em perspectiva; (B) Abertura mínima (2,9 cm ²); (C) Abertura máxima (22,4 cm ²).....	55
Figura 3.11 – Sistema de inserção de aeração auxiliar para a válvula-L.....	56
Figura 3.12 – Representação da entrada do alimentador leito de jorro (sem escala).....	57
Figura 3.13 – Caixa de amostragem de sólidos.....	59
Figura 3.14 – Vazão de sólidos em função do tempo.	60
Figura 3.15 – Localização dos pontos de tomadas de pressão.....	62
Figura 3.16 – Medidas de pressão via transdutor.....	63
Figura 3.17 – Pontos de perda de carga no medidor Venturi obtidos em uma medida pelo transdutor.	64
Figura 3.18 – Temperatura na tubulação de fornecimento de ar ao longo do tempo. Medidas realizadas em dias diferentes. Configuração: L90° + sem restrição, operando sem e com partículas.....	66

Figura 3.19 – Fluxograma de execução para obtenção dos pontos experimentais.....	67
Figura 4.1 – Fluxograma de análise dos pontos experimentais obtidos. Abreviações reunidas no Quadro 4.1.....	68
Figura 4.2 – Vazão de sólidos transportada em função da velocidade adimensional do ar, para diferentes aberturas do alimentador.....	70
Figura 4.3 – Vazão volumétrica de ar desviada pelo alimentador tubo inclinado, em m ³ /h, em função do ar de transporte para o bocal SR e diferentes aberturas do alimentador de sólidos.....	71
Figura 4.4 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional, para diferentes aberturas do alimentador de sólidos.....	73
Figura 4.5 – Pressão estática em função do comprimento adimensional do leito, para diferentes velocidades de ar. Área da guilhotina: (A)0,0 cm ² ; (B) 2,9 cm ² ; (C) 22,4 cm ²	75
Figura 4.6 – Pressão ao longo do leito, para diferentes aberturas do alimentador de sólidos e velocidade do ar de 22 m/s.....	76
Figura 4.7 – Representação gráfica para a região de entrada do leito com as configurações (A) <u>COM</u> alimentador externo e (B) <u>SEM</u> alimentador externo.....	77
Figura 4.8 – Pressão adimensional ao longo do leito para o escoamento de ar, para configurações do leito <u>COM</u> e <u>SEM</u> alimentador externo e velocidade de 22 m/s.....	77
Figura 4.9 – Razão entre os gradientes de pressão bifásicos e monofásicos em função de β , para diferentes condições de operação e aberturas de guilhotina.....	79
Figura 4.10 – Razão β em função de U/U_t	80
Figura 4.11 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para os alimentadores externos tubo inclinado e válvula-L, com diferentes valores para a variável de ajuste de vazão de sólidos.....	82
Figura 4.12 – Gradiente de pressão total em função da velocidade adimensional do ar para os alimentadores tubo inclinado (TI) e válvula-L(VL), com diferentes aberturas do alimentador.....	84

Figura 4.13 – Pressão estática em função do comprimento adimensional do leito, para velocidade do ar de 22 m/s, para as configurações de alimentação tubo inclinado (TI) e válvula-L (VL), com escoamento de ar; variável de ajuste de inserção de sólidos com valores mínimos (TI – S = 2,9 cm ² ; VL - Q _{aer} = 7 m ³ /h) e máximos (TI – S = 22,4 cm ² ; VL - Q _{aer} = 10 m ³ /h).....	85
Figura 4.14 – Razão entre os gradientes de pressão bifásicos e monofásicos em função de β , para diversas condições de operação.....	86
Figura 4.15 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para a operação com alimentador tubo inclinado e bocais para as aberturas de: (A) 2,9 cm ² ; (B) 22,4 cm ²	88
Figura 4.16 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para a operação com alimentador válvula-L e bocais para as aberturas de: (A) 57%; (B) 83%.....	89
Figura 4.17 – Vazão volumétrica de ar desviada pelo alimentador tubo inclinado em função do ar de transporte alimentado para os bocais SR, BR e BV e diferentes aberturas do alimentador de sólidos.....	90
Figura 4.18 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para diferentes configurações do sistema de alimentação (com e sem bocais) e aberturas do alimentador para (A) tubo inclinado e (B) válvula-L.....	92
Figura 4.19 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para o escoamento de ar e diferentes configurações do sistema de alimentação (com e sem bocais) com o (A) tubo inclinado e (B) válvula-L.....	93
Figura 4.20 – Pressão ao longo do leito para o tubo inclinado e diferentes bocais de entrada. U = 22 m/s (U/U _t = 2,8); abertura S = 22,4 cm ²	94
Figura 4.21 – Pressão ao longo do leito para a válvula-L e diferentes bocais de entrada. U = 22 m/s (U/U _t = 2,8); Q _{aer} = 10 m ³ /h.	94
Figura 4.22 – Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para diversas condições de operação e configuração de alimentação para as aberturas do alimentador (A) mínimas e (B) máximas.....	96
Figura 4.23 - Forma de entrada dos sólidos para cada tipo de alimentador. (A) Tubo inclinado ou válvula-L; (B) Leito de jorro; (C) Horizontal.....	97

Figura 4.24 – Vazões de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para diferentes configurações de alimentação de sólidos e condições de operação.....	99
Figura 4.25 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para diferentes configurações de entrada na condição de escoamento de ar com abertura superior do alimentador, para este estudo.....	101
Figura 4.26 – Pressão estática ao longo do leito para diferentes configurações de entrada, com velocidade do ar de transporte de 22 m/s.....	102
Figura 4.27 – Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para diversas condições de operação e configuração de alimentação para as variáveis de controle da vazão de sólidos alimentada na condição máxima.....	103
Figura 4.28 – Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para todas as condições de operação e configurações de alimentação de sólidos avaliadas nesse estudo, para as variáveis de ajuste de W_s com valores (A) mínimos e (B) máximos.....	105

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 – Correlações para o cálculo da velocidade terminal da partícula.....	6
Quadro 2.2 – Modelos de válvulas para alimentadores de sólidos (Oliveira, 2001; Ferreira e Freire, 2009).....	22
Quadro 3.1 – Condições máximas e mínimas para os alimentadores deste trabalho.....	58
Quadro 4.1 – Nomenclatura e abreviações aplicadas neste trabalho.....	69
Tabela 2.1 – Alimentadores de gás utilizados em transportadores pneumáticos (Silva, 2005).....	14
Tabela 2.2 – Eficiência de separadores gás-sólido em função do tamanho da partícula (Marcus <i>et al.</i> , 1990).....	20
Tabela 4.1 – Densidade mássica de sólidos para diversas configurações de entrada, para $U/U_t = 3$	100

NOMENCLATURA

- B – constante da equação de Forcheimer
- c – constante da equação de Forcheimer
- dp – diâmetro médio da partícula [mm]
- dp*– diâmetro da partícula calculada para a correlação de Haider e Levenspiel (1989) [-]
- Dt – diâmetro do leito [mm]
- g – gravidade [m/s^2]
- Gs – densidade de fluxo de sólidos [kg/m^2s]
- K₁, K₂ – constantes da correlação de Pettyjohn e Christiansen (1948) [-]
- L – comprimento da região de escoamento considerada [m]
- La – comprimento de entrada [m]
- P – pressão estática [kPa]
- Patm – pressão atmosférica [cm col. H₂O]
- Q – vazão volumétrica [m^3/h]
- Q_{aer} – vazão volumétrica de aeração auxiliar [m^3/h]
- Q_f – vazão volumétrica de ar de transporte [m^3/h]
- Re – número de Reynolds [-]
- S – área da seção transversal do alimentador [cm^2]
- T – temperatura do leito [°C ou K]
- U – velocidade superficial do fluido [m/s]
- U/U_t – velocidade adimensional do ar [-]
- U_t – velocidade terminal da partícula [m/s]
- U_t*– velocidade terminal da partícula calculada para a correlação de Haider e Levenspiel (1989) [-]
- v – velocidade intersticial da partícula [m/s]
- W_f – vazão mássica de fluido [kg/h]
- w_p – denominação para W_s, em quilos por segundo, no estudo de Ferreira (1996).
- W_s – vazão mássica de sólidos [kg/h]
- z – comprimento do eixo longitudinal no leito [m]

z_o – distância entre a extremidade inferior do tubo central e a entrada de ar no sistema, existente quando um alimentador leito de jorro é utilizado [mm]

Símbolos gregos:

Δh – diferença de altura entre as colunas de água num manômetro em “U” [cm]

ΔP – queda de pressão num leito bifásico gás-sólido [Pa]

$\Delta P/L$ – gradiente de pressão [Pa/m]

Ω – constante da equação de Forcheimer

β – eficiência mássica do sistema [-]

ε – porosidade [-]

ϕ – esfericidade da partícula [-]

κ – permeabilidade do leito [cm²]

μ – viscosidade do fluido [Pa.s]

ρ – densidade do fluido [kg/m³]

ρ_p – densidade da partícula [kg/m³]

ζ – medida linear do leito pneumático [m]

Abreviações:

BR – bocal redutor

BV – bocal Venturi

DP – desvio padrão

HORIZ – alimentador horizontal

LJ – alimentador leito de jorro

Md – média aritmética

SR – sem restrição

TI – tubo inclinado

VL – válvula-L

Índices:

guilh. - guilhotina

máx - máximo

mf – mínima fluidização

o – condição de escoamento sem sólidos

v – válvula-L

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Transporte Pneumático é uma operação na qual materiais pulverulentos ou granulares são transportados através de uma tubulação, suspensos numa corrente de gás (Marcus *et al.*, 1990). Estes sistemas são caracterizados por concentrações de sólidos entre 1% e 25% e altas taxas de transferência de calor e massa entre as fases, favorecidas pelo elevado contato gás-partícula (Cartaxo, 2000; Ferreira e Freire, 2009). Sua aplicação está presente em muitos processos industriais; seja como transportador propriamente dito ou em operações de secagem e reação; abrangendo ainda vários setores como o químico, petroquímico, alimentício, agrícola, entre outros.

De uma maneira geral, um leito pneumático é composto pelos alimentadores de cada uma das fases, a tubulação de transporte e um sistema de separação gás-sólido. Dentre essas partes constituintes, a alimentação de sólidos destaca-se como uma região crítica, devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, como aceleração, mistura e distribuição das partículas dentro da tubulação. Esta operação, quando realizada de forma inadequada, pode contribuir para a restrição da vazão de sólidos a valores baixos, degradação do sólido manuseado, geração de elevadas quedas de pressão no leito com conseqüente

aumento dos custos de operação, e até mesmo inviabilização de um transportador (Ferreira, 1991; Arastoopour, 1986).

Os alimentadores de sólidos possuem ainda uma variedade de configurações, como por exemplo, parafuso helicoidal, válvulas rotativas tipo palheta e tipo borboleta, válvula cônica, válvulas “L” e “J”, selo reverso, entre outras. Em algumas situações, esses alimentadores são ainda combinados com bocais de entrada restritivos. Como exemplo, pode-se citar diversos trabalhos realizados no Centro de Secagem da UFSCar desde a década de 90 (Silva *et al.* 1996; Ferreira, 1996; Silva, 1997; Álvares, 1997; Osti, 2003; Patrocínio, 2005), que utilizaram os bocais a fim de reduzir o desvio de gás de transporte e melhorar a estabilidade na alimentação, produzindo assim uma operação com controle e monitoramento facilitados.

Diante deste contexto, este trabalho teve o objetivo de estudar a fluidodinâmica de diferentes configurações de sistemas de alimentação formadas a partir de combinações de alimentadores para diferentes condições operacionais, considerando a influência destes sistemas na fluidodinâmica do leito como um todo. Nesta análise os alimentadores considerados são tubo inclinado, válvula-L, leito de jorro e alimentador horizontal, sendo os alimentadores tubo inclinado e válvula-L analisados de forma isolada e combinados com bocais de entrada restritivos. As demais configurações já têm em sua configuração original a presença de constrições. O impacto das configurações consideradas foi avaliado para o transporte de esferas de vidro com diâmetro médio de 1,0 mm, num “loop” pneumático vertical com 4,0 m de altura.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é realizada uma revisão dos tópicos de interesse para este trabalho. Inicialmente uma descrição sucinta sobre o desenvolvimento da fluidização até alcançar o transporte pneumático é apresentada, seguida pela descrição dos aspectos gerais desses transportadores. O capítulo abrange ainda a literatura acerca da alimentação de sólidos em si, com foco nos principais conceitos relacionados, nos tipos de alimentadores empregados neste estudo e nos bocais de redução.

2.1 – Formas de operação de sistemas bifásicos

Processos de indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas, alimentícias, metalúrgicas, agrícolas e geração de energia comumente empregam sistemas gás-sólido em alguma etapa de manuseio e/ou manufatura. A razão desse interesse deve-se aos diferentes modos de fluidização possíveis de serem obtidos a partir da variação da velocidade superficial do gás alimentado (Oliveira, 2001). O desenvolvimento do contato gás-sólido em relação à velocidade do gás (U) e a resposta da queda de pressão (ΔP) de cada forma de fluidização estão apresentados de forma esquemática na Figura 2.1.

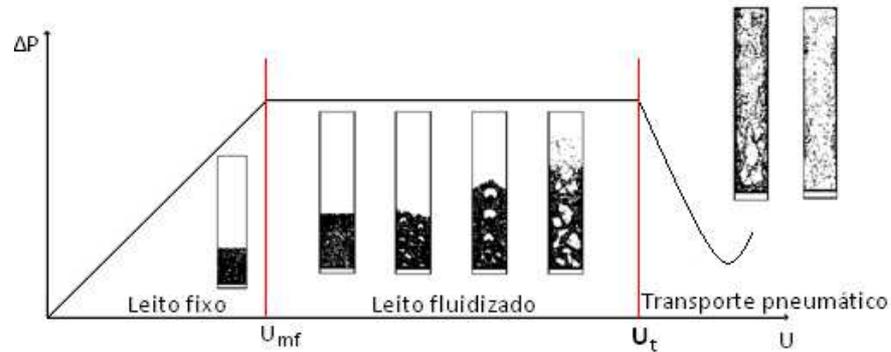


Figura 2.1- Formas de contato fluido-partícula em função da velocidade superficial do gás (Grace, 1986; Gidaspow, 1993).

A análise dessa figura mostra, para baixas velocidades do gás, um sistema do tipo leito fixo (ou empacotado), onde a perda de carga gerada ($\Delta P/L$) é proporcional a velocidade do gás. Na literatura essa proporcionalidade é estimada a partir de correlações empíricas, sendo a mais difundida a correlação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu|U|}{(\phi dp)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho|U|^2}{\phi dp} \quad (2.1)$$

onde: L – comprimento da região de escoamento considerada;

ε – porosidade do leito;

ρ , μ e U – densidade, viscosidade e velocidade superficial do fluido;

dp , ϕ – diâmetro médio e esfericidade da partícula.

Quando a queda de pressão atinge um valor capaz de suportar o peso das partículas, ou seja, o peso aparente dos sólidos (peso – empuxo) se equipara à quantidade de movimento fornecida pelo gás, diz-se que o sistema atinge o ponto

de mínima fluidização (Gidaspow, 1993). A determinação desse limite é relevante e ocorre na maioria das vezes de forma experimental, caracterizando-o pelas propriedades do sistema, como perda de carga (ΔP_{mf}) e velocidade (U_{mf}) de mínima fluidização.

A partir desse ponto, qualquer aumento na velocidade do gás fará com que a suspensão passe a se comportar como um fluido (Kunii e Levenspiel, 1991). A relação direta entre as variáveis velocidade e queda de pressão deixa de existir e o tipo de sistema fluidizado será determinado pela combinação das características dos sólidos, do leito e das condições operacionais. Em geral, inicialmente há expansão do leito, seguido de formação de bolhas. Algumas situações peculiares podem ocorrer; por exemplo, se o leito de partículas é estreito e comprido o suficiente, as bolhas formadas coalescem, formando “*slugs*”; já se a velocidade do ar é bem maior que a da mínima fluidização e a partícula é grande ($d_p > 1$ mm), o direcionamento do gás para o centro do tubo pode levar à formação de um leito de jorro (Gidaspow, 1993).

Uma característica determinante nesse desenvolvimento é a chamada velocidade terminal (U_t), que indica a velocidade limite na qual o gás é capaz de percolar o leito de sólidos, entretanto sem arrastá-lo (Perry, 1999). O cálculo dessa velocidade é também realizado através de correlações, como por exemplo, as de Pettyjohn e Christiansen (1948) e de Haider e Levenspiel (1989), que levam em conta a densidade (ρ_p), diâmetro (d_p) e esfericidade (ϕ) da partícula; e densidade (ρ) e viscosidade (μ) do fluido, como apresentado no Quadro 2.1. Dessa forma, quando a velocidade superficial do gás supera a velocidade terminal da

partícula (porção final do gráfico na Figura 2.1) têm-se os chamados sistemas de transporte pneumático.

Quadro 2.1 – Correlações para o cálculo da velocidade terminal da partícula.

Autores	Equações
Pettyjohn e Christiansen (1948)	$U_t = \frac{K_1(\rho_p - \rho)dp^2 g}{18\mu} \quad \text{para } Re \leq 0,5$ $U_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)dp g}{3\rho_f K_2}} \quad \text{para } Re \geq 1000$ $K_1 = 0,843 \log\left(\frac{\phi}{0,065}\right)$ $K_2 = 5,31 - 4,88(\phi)$
Haider e Levenspiel (1989)	$U_t^* = \left[\frac{18}{(dp^*)^2} + \frac{2,335 - 1,744\phi}{(dp^*)^{0,5}} \right]^{-1} \quad \text{quando } 0,5 < \phi < 1,0$ $U_t^* = \left[\frac{18}{(dp^*)^2} + \frac{0,591}{(dp^*)^{0,5}} \right] \quad \text{quando } \phi = 1,0$ $dp^* = dp \left[\frac{\rho g (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/3}$ $U_t = U_t^* \left[\frac{\mu g (\rho_p - \rho)}{\rho g^2} \right]^{1/3}$

2.2 – Transporte pneumático

Sistemas de transporte pneumático são definidos como operações unitárias onde sólidos pulverulentos ou granulares são movimentados através de uma tubulação, suspensos numa corrente de gás (Marcus *et al.*, 1990). Esses leitos são caracterizados por concentrações volumétricas de sólidos variando de 1% a 25% e altas taxas de transferência de calor e massa, favorecidas pelo elevado contato gás-partícula dentro do equipamento (Ferreira e Freire, 2009; Cartaxo, 2000).

Tal tecnologia tem amplo aproveitamento em diversos processos de deslocamento de sólidos, devido à versatilidade do modo de operação e da forma de configuração do leito, além de atuarem como secadores e/ou reatores, uma vez que a fluidodinâmica é satisfatória para algumas dessas operações. Outras vantagens dos transportadores pneumáticos são o baixo custo de manutenção, facilidade de montagem, automação e controle, operação limpa e com redução de perdas de material, e a viabilidade de combinações de funções de captação e distribuição de sólidos em diferentes pontos de uma planta industrial dentro de um mesmo equipamento (Silva, 2005).

Na busca por aperfeiçoamento destes sistemas, são encontrados na literatura estudos que têm como objetivo a superação das dificuldades inerentes aos sistemas pneumáticos. Essas são, na maioria das vezes, relacionadas às questões econômicas do processo, como restrição do deslocamento a distâncias curtas, devido ao elevado custo energético da operação, além do atrito e abrasão no equipamento, podendo danificar tanto o produto manuseado quanto partes do

leito. Alguns trabalhos procuram uma melhor compreensão acerca dos fenômenos físicos envolvidos em transportadores pneumáticos, através do desenvolvimento de técnicas refinadas para a obtenção de medidas experimentais precisas e modelos matemáticos complexos utilizados para simulações. Há ainda a proposta de formas de operação otimizadas (Williams e Jones, 2008), com leitos que carregam uma quantidade de sólidos elevada usando uma baixa vazão de gás de transporte (regime denso).

Basicamente, um sistema de transporte pneumático pode operar com dois tipos de regimes de escoamento: o regime diluído e o regime denso. Detalhadamente, um escoamento avaliado como diluído é caracterizado por altas vazões de gás, além da presença de uma suspensão homogênea com concentração de sólidos abaixo de 5 % (Santana *et al.*, 1980; Joseph e Klinzing, 1983; Monceaux *et al.*, 1986). Nesse modo de transporte o movimento do sólido é orientado pelo balanço de forças em cada partícula e o efeito das colisões sólido-sólido e sólido-parede são pouco significantes, de tal modo que a perda de carga gerada no leito provém principalmente do atrito entre o gás e a parede da tubulação (Leung, 1980; Cartaxo, 2000).

Já a determinação de regime denso é aplicada aos escoamentos com vazões de gás de transporte relativamente baixas e elevadas concentrações de sólidos. A suspensão tem caráter heterogêneo, sendo possível observar aglomerados ou recirculação de sólidos, e os valores de porosidade variam entre 0,75 e 0,8 (Leung, 1980). Por essa razão, nesse escoamento o contato partícula-partícula desempenha papel fundamental, controlando totalmente o movimento

dos sólidos, e a perda de carga no leito é gerada principalmente pela densidade da suspensão (nesse caso, elevada) (Cartaxo, 2000).

Apesar das colocações serem distintas para cada caso, vale destacar que o limite real entre os regimes de escoamento diluído e denso não é consenso na literatura, sendo esta região de transição definida de diferentes maneiras em vários estudos (Yosufi e Gau, 1974; Yang, 1978, Satija *et al.*, 1985). Uma dessas metodologias para avaliar tal transição é a de Rizk (1986), que propõe a obtenção de curvas do gradiente de pressão ($\Delta P/L$) em função da velocidade média do gás de transporte (U), para valores fixos de vazões de sólidos (W_s), como representado esquematicamente na Figura 2.2, na qual se observam duas regiões com comportamentos do gradiente de pressão distintos.

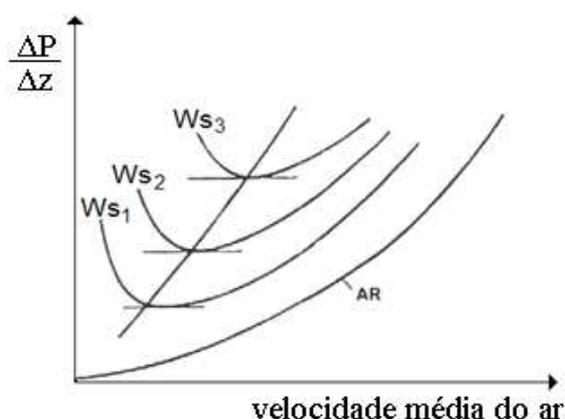


Figura 2.2 – Diagrama de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar (Marcus *et al.*, 1990).

Para velocidades do ar mais elevadas, a queda de pressão aumenta à medida que a velocidade aumenta, caracterizando assim um escoamento em regime diluído. Já o escoamento denso, localiza-se na outra porção da curva, onde

o gradiente de pressão cai à medida que a velocidade do ar aumenta. Entre as seções de escoamento denso e diluído, há um ponto onde o gradiente de pressão é mínimo, sendo este o ponto definido como a condição limite entre os regimes (Marcus *et al.*, 1990). Rizk (1986) sugeriu uma equação empírica para localizar esta transição, baseada nos diâmetros do leito (D_t) e do sólido (dp) e nas condições operacionais (vazões mássicas de fluido (W_f) e de sólidos (W_s) e a velocidade superficial do ar de transporte (U)), de acordo com a seguinte equação, válida para valores de dp entre 0,4 e 6 mm.

$$\frac{W_s}{W_f} = \frac{1}{10^{(1,44dp+1,96)}} \left(\frac{U}{(D_t g)^{1/2}} \right)^{(1,1dp+2,5)} \quad (2.2)$$

onde: g – força da gravidade.

Outro fator polêmico são as diversas estruturas de escoamento denso possíveis de serem obtidas, já que essa depende de características do sistema gás-sólido e do tipo de transição entre os modos de transporte. Na literatura é possível encontrar desde diagramas de estruturas de escoamentos simplificados até possibilidades bastante complexas (Yosufi e Gau, 1974; Yang, 1978; Leung, 1980; Satija *et al.*, 1985). Por não ser este o foco deste estudo, que avalia apenas situações com regime diluído, somente a classificação proposta por Leung (1980) será apresentada para exemplificação. Na Figura 2.3 é exibido um esquema gráfico que representa as possibilidades de escoamento da classificação selecionada.

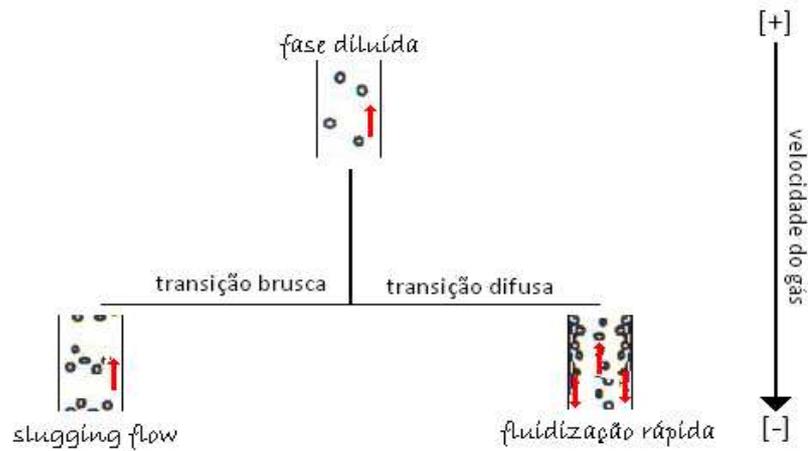


Figura 2.3 – Desenvolvimento das estruturas de escoamento num transportador pneumático vertical extraído de Lopes *et al.* (2009), a partir da classificação de Leung (1980).

Nesse contexto, num leito que opera em fase diluída, à medida que a velocidade do gás é reduzida, o sistema tende a passar para o regime denso. Essa transição pode ocorrer de forma brusca, situação em que há ocorrência do fenômeno de “*choking*”, caracterizado por um colapso no movimento da suspensão, com surgimento de um escoamento pulsátil, instável e com quedas de pressão elevadas e oscilatórias. Essa estrutura de escoamento é denominada “*slugging flow*”. Outra possibilidade é a transição entre os regimes ocorrer de maneira difusa, onde a porosidade da suspensão é reduzida gradativamente. A estrutura de escoamento formada é chamada fluidização rápida, e nesse caso, no leito passam a coexistir duas regiões de transporte; uma na porção central da tubulação, de escoamento diluído e ascendente, e outra nas proximidades da parede do tubo, com escoamento denso e descendente, caracterizando um movimento de recirculação interna de sólidos.

2.3 – Estrutura física de um transportador pneumático

Em relação à estrutura física de leitos de transporte pneumático, pode-se considerar que basicamente três ações devem ser realizadas no sistema: a alimentação, o deslocamento e a separação das fases. Portanto, a constituição dessa estrutura é formada por alimentadores para a fase sólida e fluida, uma região de transporte propriamente dito e um dispositivo de separação das fases, como apresentado no diagrama da Figura 2.4.

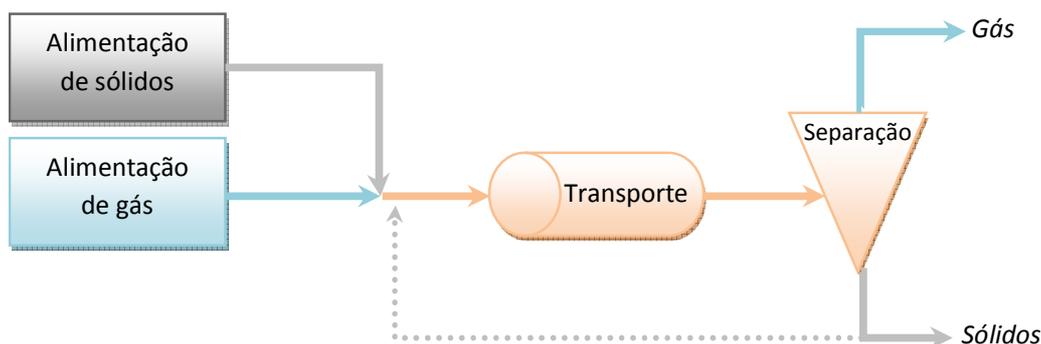


Figura 2.4 – Diagrama de um sistema de transporte pneumático adaptado de Marcus *et al.*, 1990.

Cada uma dessas etapas tem seus principais aspectos comentados a seguir. Como a alimentação de sólidos é o principal foco do estudo, sua análise será apresentada no Item 2.4.

2.3.1 – Alimentação de gás

Nesse estágio, dispositivos que captam ar do ambiente e provêm a este energia para carregar sólidos por uma determinada distância são aplicados. Existem diversos tipos de equipamentos e a escolha do modelo é relacionada principalmente ao intervalo ou valor de vazão de gás necessário, o tipo de gás manuseado (por exemplo, com ou sem partículas) e custos operacionais. Dependendo ainda do emprego e do tipo de equipamento, pode ser necessária a utilização de secadores ou filtros de ar antes da alimentação de gás, ou ainda a utilização de resfriadores ou filtros de óleo após o alimentador (Silva, 2005). Na Tabela 2.1 estão listados diversos modelos de alimentadores de gás, bem como a pressão efetiva de deslocamento, potência necessária para o motor, seu rendimento e a necessidade ou não de refrigeração.

Antes do ar de transporte alimentado ser misturado aos sólidos, é necessário um trecho de tubulação onde o escoamento monofásico torna-se estabelecido e, no ponto de inserção de sólidos, a energia de carregamento desse ar não seja dissipada devido à turbulência do escoamento de gás, característica em trechos com escoamentos não desenvolvidos. Para garantir ainda uma distribuição do ar em toda a seção transversal da tubulação, a colocação de distribuidores de ar anteriores à região de inserção de sólidos também é comumente aplicada.

Tabela 2.1 – Alimentadores de gás utilizados em transportadores pneumáticos (Silva, 2005).

TIPO	OPERAÇÃO				
	Vazão de ar (m ³ /h)	Pressão efetiva (Pa)	Potência do motor (kW)	Rendimento (%)	Consumo de água (m ³ /h)
Ventiladores centrífugos	5000	5000	15	80	-
Bombas de anel líquido	1000	50000	30	78	2,4
Bombas e compressores de lóbulos rotativos	1000	600000	30	71	-
Compressores de palhetas	1000	200000	55	85	-
Compressores de parafusos	1000	200000	75	72	4,5
Compressores de pistões alternativos	1000	200000	55	87	2,6

2.3.2 – Transporte

Nessa região, a mistura bifásica é de fato deslocada de um ponto ao outro. O circuito de transporte é formado basicamente por tubulação e acessórios (curvas, bifurcações, restrições, etc.), e o material de fabricação desta depende principalmente da natureza das fases e das condições operacionais que serão utilizadas no sistema, além do tipo de aplicação do leito. Outra característica da tubulação que deve ser selecionada com cautela é o diâmetro, a fim de que a velocidade do gás de transporte necessária seja garantida em todo o trajeto (Silva, 2005) e para que a razão entre os diâmetros do sólido e do tubo de transporte

sejam favoráveis, especialmente quando há necessidade de se obter medidas de velocidade das fases (Lopes *et al.*, 2009).

Como já citado, uma das principais vantagens dos leitos pneumáticos é a flexibilidade do percurso, podendo o escoamento gás-sólido ser vertical, horizontal, inclinado, e na maioria dos casos, misto. Essa mudança de direção normalmente é realizada através da colocação de acessórios, como curvas, cotovelos e tubos flexíveis. Ao atravessar uma curva, no escoamento bifásico gás-sólido, o material particulado se estratifica numa pequena porção da tubulação junto à parede (“*rope*”), como apresentado na Figura 2.5. Esse movimento de separação das fases ocorre devido ao balanço de forças presente, composto pelas forças centrífuga, viscosa e gravitacional, e ainda produz perturbações a jusante e a montante da curva e pode induzir fenômenos como inversão de fases e escoamentos secundários e reversos (Scharllert e Levy, 2000; Akili *et al.*, 2001; Azzi *et al.*, 2002).

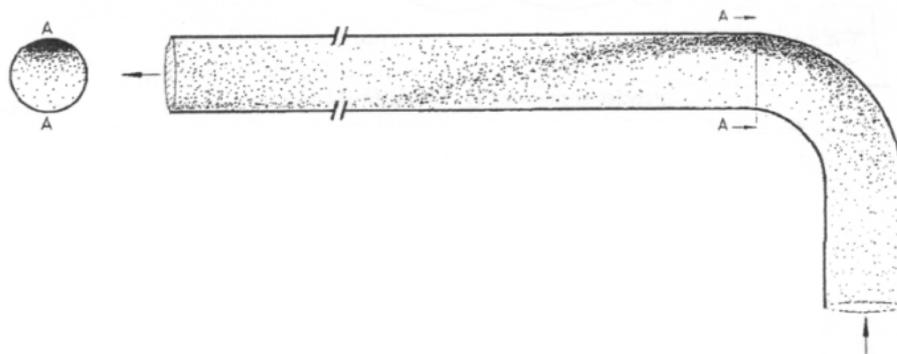


Figura 2.5 – Escoamento gás-sólido através de uma curva (Akili *et al.*, 2001).

Uma vez formado, o “*rope*” gradativamente se dissolve, sendo as partículas novamente misturadas ao fluido devido à turbulência do escoamento e, em alguns casos, à presença de escoamentos secundários (Scharllert e Levy, 2000). A literatura apresenta ainda outros parâmetros relevantes para esse processo de formação e dispersão de um “*rope*” como a velocidade do gás de transporte, o raio de curvatura, a vazão de sólidos, a orientação da curva em relação à gravidade, a rugosidade do tubo e o diâmetro e densidade da partícula transportada (Huber e Sommerfeld, 1994; Yang e Kuan, 2006).

Além de afetar a estrutura de escoamento, as curvas ainda provocam desaceleração da fase sólida, aumento na perda de carga gerada pelo sistema, e em algumas situações pode causar degradação ao material manuseado. Assim, apesar da utilização desses acessórios agregarem muita versatilidade aos sistemas pneumáticos, a literatura recomenda que seja evitada a colocação de curvas desnecessárias, para que a operação do sistema não seja comprometida nos seus aspectos técnicos e energéticos (Kalman, 2000).

Num escoamento dentro de uma tubulação, seja de um fluido puro ou com partículas, a ocorrência dos efeitos de entrada já é um fenômeno bem documentado. Esses efeitos são gerados pelo desenvolvimento da camada-limite a partir da entrada do tubo até uma distância dentro da tubulação, na qual a troca de quantidade de movimento (frenagem) iniciada junto à parede difunde-se até o centro do tubo (Bovo e Ferreira, 2004; Giorgetti, 2008). Desse ponto em diante o escoamento é considerado desenvolvido e essa distância compreendida entre a entrada e o início do escoamento desenvolvido é chamado comprimento de entrada ou zona de aceleração (L_a).

A zona de aceleração de sistemas de transporte pneumático é caracterizada por uma intensa transferência de quantidade de movimento, já que as fases apresentam inicialmente perfis de velocidade muito discrepantes (Marcus *et al.*, 1990). Esse comportamento fluidodinâmico é acompanhado ainda por mudanças nos perfis de concentração volumétrica, da turbulência (variação esta que favorece a mistura das fases) e outros parâmetros relacionados (Littman *et al.*, 1993). O comprimento dessa região é dependente ainda de diversos fatores do sistema, entre eles o n° de Reynolds do escoamento, o diâmetro e a rugosidade do tubo de transporte, propriedades dos sólidos e concentração da fase particulada (Bovo e Ferreira, 2004), além das configurações do alimentador de sólidos e do ponto de mistura das fases (Silva, 1997; Lopes, 2007).

A princípio, identificar o comprimento de entrada parece muito simples, já que este ponto corresponde ao local do tubo de transporte onde o gradiente de velocidade é nulo $\left(\frac{dv}{dz}\right) = 0$. Entretanto, a realização de medidas precisas da velocidade local de um conjunto de partículas dispersas num meio fluido com escoamento turbulento é complexa. Como alternativa, a aplicação das equações de continuidade e de quantidade de movimento para a mistura mostra que nessa região de escoamento estabelecido (não acelerado) o perfil de pressão estática ao longo desse trecho tem comportamento linear (Marcus *et. al.*, 1990).

Assim, uma metodologia empregada para a determinação do comprimento de entrada em leitos pneumáticos é a obtenção de perfis axiais de pressão estática ao longo do escoamento, como apresentado na Figura 2.6. A posição que identifica o fim do comportamento não linear e início do linear no gráfico é o

valor do comprimento de entrada (L_a). Apesar da simplicidade desta técnica face à medida de velocidade dos sólidos no sistema, vale lembrar que nesse modo há erros na determinação do valor do comprimento. Essa imprecisão do método deve-se principalmente ao fato do perfil de pressão apresentar variação assintótica.

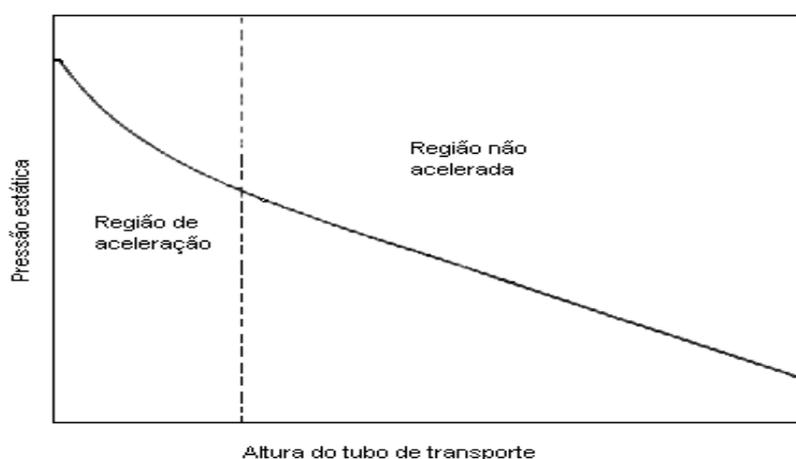


Figura 2.6 - Pressão estática ao longo de um transportador pneumático (Silva, 1997).

Bovo e Ferreira (2004) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar diferentes métodos de estimativa de L_a . Para isso, na porção inicial de um leito pneumático com alimentador tipo parafuso helicoidal inclinado foram feitas medidas de pressão a cada 2 mm, dispostos na forma de um helicóide. As autoras concluíram que os métodos avaliados, baseados no princípio de identificação do trecho não linear do perfil de pressão, são recomendados para realizar estimativas de L_a , nas situações em que a precisão não seja um requisito importante. Mostraram ainda que a utilização de correlações empíricas da literatura, como as

de Rose e Duckworth (1969) e de Enick e Klinzing (1984), apresentaram resultados insatisfatórios, já que os valores encontrados para La ultrapassaram o comprimento da tubulação do leito.

2.3.3 – Separação gás-sólido

Dependendo da configuração do leito pneumático, localizado na porção intermediária/final do sistema, há a presença de dispositivos que promovem a separação das fases. Com as fases separadas, os sólidos são coletados externamente ou retornam ao leito pneumático, caracterizando configurações em “*loop*”, como as utilizadas para operações de secagem e reação. Já a fase gasosa é quase sempre lançada na atmosfera, fazendo com que nos últimos anos uma maior atenção seja despendida para o alto desempenho desses dispositivos, devido ao impacto ambiental que esta descarga pode gerar, já que com este gás pode haver o carregamento de poeira.

Assim, a seleção do separador mais adequado passa por questões primordiais como o comportamento dinâmico do sólido (por causa do tamanho da partícula), a eficiência de coleta almejada e o potencial poluente do particulado. Na Tabela 2.2, é apresentada a eficiência de diversos modelos de equipamentos, de acordo com o tamanho da partícula.

Tabela 2.2 – Eficiência de separadores gás-sólido em função do tamanho da partícula (Marcus *et al.*, 1990)

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

Outros pontos relevantes a serem considerados ainda são a queda de pressão total do sistema, a perda de partículas finas (pó), a segregação e degradação das partículas e o custo. Esses equipamentos são representados por métodos gravitacionais, ciclones e filtros, sendo a maior aplicação de ciclones, e dispostos em série para uma alta eficiência, já que nesses dispositivos quanto menor seu tamanho, menor será o tamanho do sólido coletado. Informações detalhadas a respeito de cada um dos separadores gás-sólido podem ser encontradas nas referências Perry (1999) e Silva (2005), entre outras.

2.4 – Alimentação em sistemas de transporte pneumático

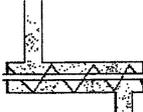
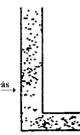
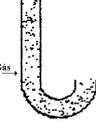
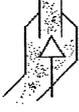
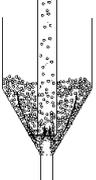
A análise de algumas plantas industriais e estudos científicos envolvendo transportadores pneumáticos evidenciam uma gama de possibilidades de dispositivos para a alimentação de sólidos, com diversas configurações e princípios de atuação. Essa variedade deve-se ao fato de que o alimentador é

diretamente relacionado com a viabilidade técnica e econômica do leito, além da possibilidade de geração de problemas operacionais graves, que podem inclusive inviabilizar um sistema, como restrição da vazão de sólidos a valores relativamente baixos, alteração da estabilidade operacional e degradação severa do material manuseado (Arastoopour, 1986; Marcus *et al.*, 1990; Ferreira, 1991).

O alimentador de sólidos é ainda considerado crítico devido à intensa transferência de quantidade de movimento no ponto de mistura das fases, tendo a fase gasosa um perfil de velocidade estabelecido (ou quase estabelecido), ao passo que a fase particulada possui baixa velocidade, algumas vezes com valores próximos a zero. A combinação dessa variação de quantidade de movimento com a elevada turbulência, inerente da região, provoca um aumento na perda de carga gerada pelo sistema, que, por conseguinte, elevam os custos de operação do equipamento (Marcus *et al.*, 1990). Assim, para que a operação de um alimentador conduza a um bom desempenho do sistema como um todo, não o prejudicando, sua especificação deve considerar as características do material e do sistema, permitir um bom controle de vazões, com distribuição uniforme e regular de sólidos, além de minimizar ao máximo o aumento da queda de pressão do equipamento.

Os alimentadores mais comuns estão apresentados de forma esquemática no Quadro 2.2, onde os alimentadores são classificados em relação à dependência da vazão de sólidos em relação à vazão de ar de transporte (não-mecânicos ou mecânicos).

Quadro 2.2- Modelos de válvulas para alimentadores de sólidos
(Oliveira, 2001; Ferreira e Freire, 2009).

Alimentadores mecânicos	Alimentadores não-mecânicos
 <p>Parafuso helicoidal</p>	 <p>Válvula – L</p>
 <p>Válvula rotativa tipo palheta</p>	 <p>Válvula-J</p>
 <p>Válvula rotativa tipo borboleta</p>	 <p>Válvula –V</p>
 <p>Válvula tipo cônica</p>	 <p>Leito de jorro</p>

Num primeiro momento, alimentadores em leitos pneumáticos eram majoritariamente do tipo mecânico, já que a vazão de sólidos no sistema tem variação apenas com a variável de ajuste da descarga de sólidos (por exemplo, a rotação do parafuso helicoidal), reduzindo a necessidade de monitoramento. Além desses fatores, o grande diferencial dos alimentadores mecânicos em relação aos demais é a capacidade de vedação, o que evita o escape de ar de transporte pelo alimentador de sólidos (Sankar e Smith, 1986 *in* Oliveira, 2001). Dispositivos desse tipo são adequados para operações em condições normais de temperatura e pressão (ambientes).

Todavia, com a ampliação do uso de sistemas de transporte pneumático para diversas tecnologias, a necessidade da aplicação em condições operacionais agressivas tornou-se irrefutável, como pressões e temperaturas elevadas, sólidos abrasivos, friáveis, etc. Diante desse contexto, surgiram os denominados alimentadores não-mecânicos, que são aptos para condições adversas de operação, pois não possuem partes móveis.

De uma maneira ampla, alimentadores não-mecânicos são válvulas nas quais o ajuste de descarga de sólidos é determinado em função da geometria deste alimentador e de uma variável de ajuste de entrada de sólidos, por exemplo, aeração auxiliar ou abertura de uma válvula. A vazão de sólidos pode ainda ser afetada pela vazão de ar de transporte. Esses dispositivos são de construção fácil, baixo custo de aquisição e raramente apresentam problemas mecânicos. Porém, como a vazão de sólidos é dependente de mais de uma variável, tem-se uma maior complexidade fluidodinâmica do alimentador, levando a dificuldades na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e então, otimização do sistema em questão (Álvares, 1997).

Como já apresentado, os efeitos da região de alimentação de sólidos não ficam restritos ao ponto de mistura das fases; eles se propagam pelo tubo de transporte, caracterizando a chamada região de aceleração (La). Alguns trabalhos da literatura apontam para a importância da configuração do alimentador no comprimento da região de entrada, além de afetar diretamente a estrutura de escoamento na porção inicial do sistema (Silva, 1997; Osti, 2003; You *et al.*, 2009).

No Anexo I, está apresentado um quadro onde estão listados alguns dos principais trabalhos que consideram a alimentação de sólidos em transportadores pneumáticos, além de trabalhos importantes no estudo de alimentadores. Destes, estão destacados o objetivo principal e os alimentadores e partículas utilizados. Alguns desses trabalhos estão comentados a seguir.

Littman *et al.* (1993) desenvolveram um estudo onde o principal objetivo era encontrar correlações adequadas para se calcular o coeficiente de arraste efetivo para as regiões de aceleração e desenvolvida de um leito pneumático com um alimentador tipo leito de jorro. O modelo utilizado para a análise dos dados emprega as equações de continuidade e de quantidade de movimento de cada fase propostas por Capes e Nakamura (1973). Em relação à estrutura do escoamento, os autores avaliaram a turbulência da região de entrada, notando que, juntamente com a porosidade, essa característica muda ao longo do trecho. Essa variação da turbulência tem participação ativa na mistura das fases, já que os sólidos entram no sistema próximo à periferia e vão se distribuindo gradualmente através da tubulação.

Dizdo *et al.* (2002) propuseram um método de estimativa para o valor inicial da velocidade dos sólidos, parâmetro importante na solução de modelos numéricos para a região de aceleração num transporte pneumático vertical diluído. Os resultados mostraram que, na região de entrada, a força que mais varia é a inercial, sendo esse parâmetro importante na estimativa do valor inicial de velocidade dos sólidos. Entretanto, o estudo não foi capaz de definir a relevância da configuração do alimentador para a correlação proposta.

Yan *et al.* (2003) depois de observarem que, apesar da maioria das unidades industriais de leitos fluidizados circulantes operarem com densidades de fluxo de sólidos (Gs) de 400 a 1200 kg/m²s e os estudos sobre estes leitos serem realizados em sistema com Gs abaixo de 200 kg/m²s, avaliaram a influência das regiões de entrada e saída nos perfis axial e radial de concentração de sólidos e velocidade da partícula num leito fluidizado circulante que opera com escoamentos de sólidos elevados. Realizaram o estudo através da obtenção de pontos experimentais de concentração de sólidos e velocidade da partícula em três regiões do sistema (entrada, desenvolvida, saída) utilizando sensores de fibra ótica próprios para cada medida. Da análise dos resultados, ressaltaram que os perfis avaliados de concentração e velocidade dos sólidos no sistema são não-uniformes e essas não uniformidades são acentuadas com o aumento de Gs. Os perfis de concentração e velocidades da fase sólida são ainda assimétricos nas regiões de entrada e saída, devido à influência dessas singularidades, e aqui também quanto maior Gs, mais pronunciadas são as não-uniformidades.

Um estudo experimental-numérico da região de entrada de um leito fluidizado circulante diluído foi realizado por De Wilde *et al.* (2005), onde foram capazes de gerar, através da técnica de Anemometria Laser Doppler, imagens tridimensionais do comportamento da velocidade da partícula, e pela análise dessas imagens puderam observar que as configurações de entrada têm relevância para o modelo do escoamento em *risers*, principalmente na mistura radial das fases sólida e fluida. Detectaram, para um sistema em escala piloto, que as perturbações de entrada e saída são rapidamente dissipadas, não apresentando interações entre si. Perto da entrada de sólidos, as partículas ficam concentradas

no lado do tubo no qual são lançadas, e o gás é desviado para o outro lado. Esses efeitos são dissipados rapidamente devido às forças viscosas presentes.

Com a validação do modelo numérico proposto por De Wilde *et al.* (2005), através dos pontos experimentais medidos no *riser* de escala piloto, esses autores simularam o escoamento num *riser* diluído em escala industrial. Dessa simulação, notaram que nessa escala, o desvio do gás na entrada de sólidos não têm dissipação rápida como nos resultados da escala piloto, agindo sobre todo o restante do leito. Isso ocorre porque, em sistemas de escala industrial, há diminuição da influência das forças viscosas. E ainda na escala industrial, as perturbações e efeitos de entrada e saída não são necessariamente independentes, o que pode levar a fluidodinâmica do sistema a uma complexidade maior ainda.

Kim *et al.* (2008) estudaram a influência da configuração de entrada em um leito fluidizado circulante (CFB), levando em conta os valores de escoamento e inventário de sólidos. Avaliaram três alimentadores não-mecânicos: selo reverso, válvula-L e válvula-J. Os autores observaram que a obtenção de vazões de sólidos elevadas num CFB é totalmente dependente das configurações de entrada e saída, e apontaram a configuração de alimentação válvula-L como a que provê um comportamento do escoamento mais estável.

Recentemente, You *et al.* (2009) investigaram através de análise numérica o efeito de vários alimentadores na estrutura de escoamento e a estabilidade do escoamento num *riser* em diferentes condições operacionais. Os alimentadores estudados foram a válvula-J e a válvula-L, com duas diferentes configurações. Desta análise pode-se concluir que o comprimento de entrada e a estabilidade do

escoamento dependem da configuração do alimentador. Os autores afirmaram que, na região de entrada, a estrutura do escoamento e o comprimento da região de aceleração são afetados pelo tipo de alimentador, e quase independentes das condições operacionais. Já na região de escoamento estabelecido, o tipo de alimentador de sólidos não é um fator relevante na estabilidade do escoamento.

Na seqüência, as válvulas alimentadoras aplicadas no estudo desta tese têm sua caracterização detalhada, levando em conta aspectos como a queda de pressão gerada e a capacidade do alimentador em promover e controlar a descarga de sólidos, identificando os parâmetros relevantes para esse controle (Oliveira, 2001).

2.4.1– Alimentador tubo inclinado

Esse alimentador nada mais é do que um tubo com inclinação, que conecta a saída do reservatório de sólidos com o ponto de inserção dos mesmos no leito pneumático, como representado na Figura 2.7.

O escoamento nesse alimentador é semelhante ao de um leito deslizante, onde a força peso do material transportado tem que ser superior à somatória das forças que impõe resistência ao escoamento, como vazões de gás contrárias ao sentido da alimentação e forças de atrito. Outros fatores são ainda determinantes para a vazão de sólidos alimentada, como o ângulo de inclinação, diâmetro da tubulação na entrada e saída do alimentador, configuração da junção reservatório

alimentador e alimentador-leito (por exemplo, restrições ou expansões), tamanho da partícula, formato, distribuição granulométrica, densidade, coesividade, temperatura do produto e umidade (Lopes, 2007).

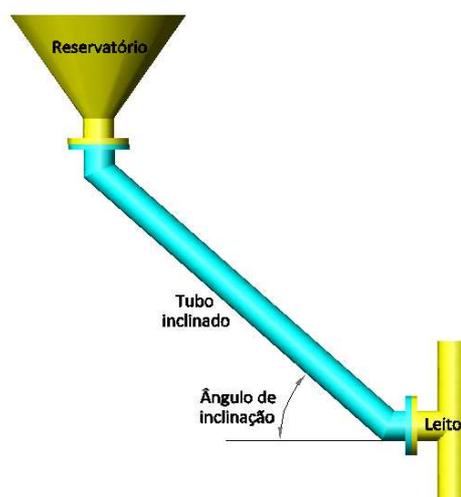


Figura 2.7 – Alimentador tubo inclinado.

Dessa forma, a descarga de sólidos se dá a partir do balanço de forças que age no conjunto das partículas dentro do alimentador. Para ampliar o espectro de vazões de sólidos, muitas vezes esses dispositivos são acoplados, na porção inicial ou intermediária, as válvulas guilhotinas, onde a área disponível para passagem de sólidos é ajustada, constituindo assim mais um parâmetro para o ajuste da vazão de sólidos.

Como a operação desse dispositivo é totalmente acoplada à fluidodinâmica do sistema, sua utilização em leitos pneumáticos deve ser avaliada com bastante cautela. Em contrapartida, pelo princípio de funcionamento ser basicamente a

ação da força da gravidade, esses equipamentos promovem economia energética, despertando grande interesse para o setor industrial (Feltran, 2005).

2.4.2 – Alimentador válvula-L

A denominada válvula-L é constituída por dois tubos, conectados perpendicularmente, caracterizando assim o formato que leva a seu nome, como mostrado na Figura 2.8. O trabalho pioneiro que estudou a caracterização de uma válvula-L como alimentador de partículas foi realizado por Knowlton e Hirsan em 1978.

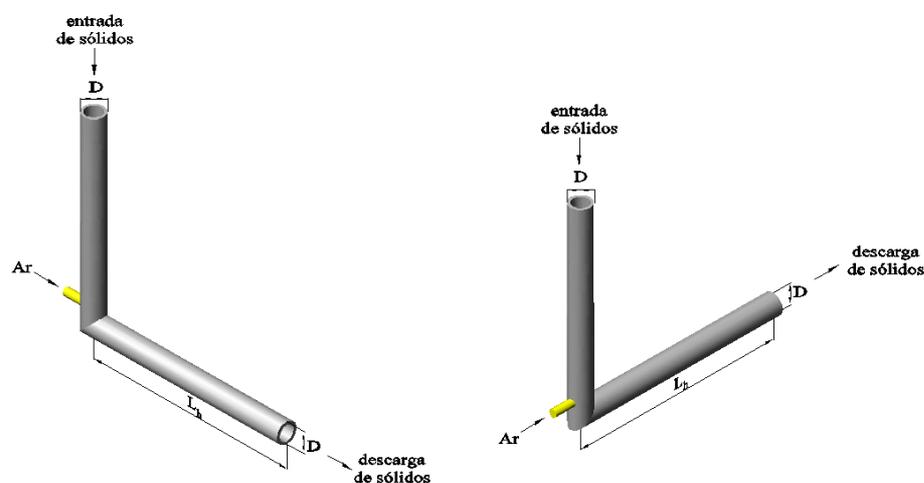


Figura 2.8- Alimentador válvula-L.

No trecho vertical, a extremidade superior constitui a entrada da válvula, normalmente conectada ao reservatório de sólidos. A certa altura deste trecho, está localizado um ponto de aeração, responsável pela abertura e fechamento do

alimentador. Na literatura o trecho vertical acima deste ponto é denominado tubo de descida (“*standpipe*”). A localização desta entrada de ar é um parâmetro de projeto importante, já que tem influência direta na necessidade de aeração. Assim, o ponto ótimo para a inserção da aeração numa válvula-L deve estar localizado próximo à região inferior do tubo de descida (Knowlton e Hirsan, 1978), pois se este estiver mais distante, reduzindo o comprimento do tubo de descida, a quantidade de ar requerida para alimentar o sistema com certa vazão de sólidos aumenta consideravelmente, pois a aeração demandada pela “L” tem relação inversa com o comprimento do tubo de descida. Na porção horizontal, a extremidade aberta é o ponto de descarga de sólidos, sendo conectada ao sistema onde a válvula será aplicada.

Na operação de uma válvula-L, o parâmetro de entrada é a vazão de aeração requerida (Q_{aer}) e como respostas do sistema têm-se a vazão de sólidos fornecida pelo alimentador (W_s) e o gradiente de pressão gerado na válvula ($\Delta P_v / L$). Esses parâmetros, além de inter-relacionados, são afetados ainda pelas características de projeto da válvula-L e do material manuseado no sistema, como diâmetro e densidade da partícula.

A aeração requerida pela válvula aumenta com o aumento do diâmetro e diminuição do comprimento do tubo de descida. Outro fator que influencia essa aeração é o fato da “L” ter seu ponto de descarga conectado a um sistema ou aberto para a atmosfera, sendo essa informação fundamental no estabelecimento da máxima vazão de sólidos fornecida. Isso ocorre porque, dependendo da configuração, o fator limitante será, respectivamente, ou o gradiente de pressão no tubo de descida com valor igual ao do ponto de fluidização dos sólidos, ou o

tamanho da saída do reservatório. Já a perda de carga na válvula é afetada pelas dimensões da seção horizontal da válvula-L, aumentando com o aumento do comprimento e redução do diâmetro desta seção.

2.4.3 – Alimentador leito de jorro

O alimentador leito de jorro é como se fosse um leito de jorro com um longo tubo “*draft*”, onde a vazão de sólidos é controlada pela vazão de gás de transporte, pela distância z_0 (distância entre a extremidade inferior do tubo central e a entrada de ar no sistema) e pela pressão no topo da região anular (Ferreira, 1991; Littman *et al.*, 1993; Ferreira, 1996) . Esse dispositivo foi proposto por Ferreira (1991) no Departamento de Engenharia Química da UFSCar, sendo aperfeiçoado ao longo de toda a década de 90. A Figura 2.9 apresenta um esquema deste equipamento.

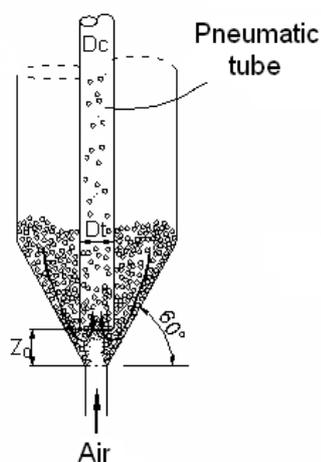


Figura 2.9 – Alimentador tipo leito de jorro (Ferreira e Freire, 2009).

A fluidodinâmica do alimentador apresenta-se similar à de um leito de jorro com tubo “*draft*”, composta por três regiões distintas. Inicialmente o aumento da velocidade do gás de transporte provoca um aumento na queda de pressão, similar a um leito fixo, e o transporte pneumático dos sólidos não se estabelece. Esse comportamento segue até a queda de pressão atingir um valor máximo. A partir desse ponto, tem início um escoamento instável e pulsátil, e a relação velocidade do ar-queda de pressão, apresenta comportamento contrário ao anterior. Aumentando-se mais a velocidade do ar tem início o transporte estável dos sólidos. Nesta região a queda de pressão oscila pouco e desvios entre as medidas praticamente não são observados (Ferreira, 1996; Sousa, 2009). Esse desenvolvimento está representado na Figura 2.10 a seguir, para o transporte de esferas de vidro com diâmetro médio de 2,7 mm.

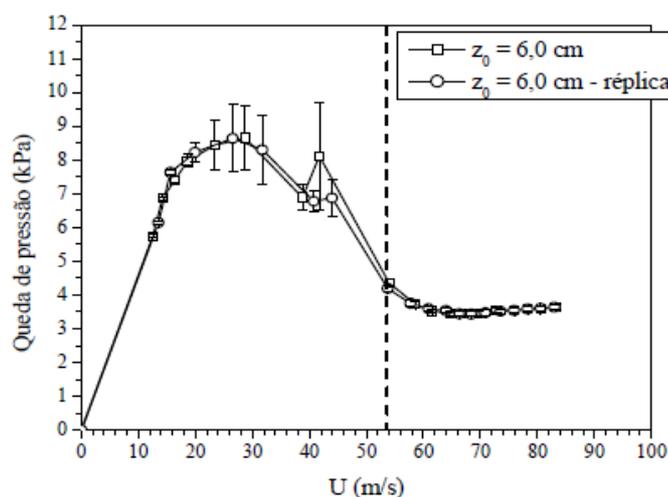


Figura 2.10- Queda de pressão em função da velocidade do ar (Sousa, 2009).

Como já dito, a vazão de sólidos nesse equipamento é diretamente relacionada principalmente com dois fatores: vazão de gás de transporte (U) e a

distância z_0 . Nos estudos sobre esse alimentador (Ferreira, 1991; Littman *et al.*, 1993; Ferreira, 1996; Grbavčić *et al.*, 1997; Silva, 1997; Sousa, 2009) fica claro que um aumento em z_0 produz vazões de sólidos maiores, devido ao aumento da área de entrada de sólidos facilitar o escoamento para o interior do tubo de transporte. Já a relação vazão de sólidos-vazão de ar de transporte apresenta duas situações.

Ferreira (1996) relatou que, quando o sistema não possui um bocal de redução no ponto de entrada do ar de transporte, a vazão de sólidos diminui com o aumento da vazão do ar. E argumentou que esse comportamento deve-se ao fato de parte do ar de transporte alimentado ser desviado para a região anular do leito, criando uma resistência maior à entrada dos sólidos no tubo de transporte (Figura 2.11-a).

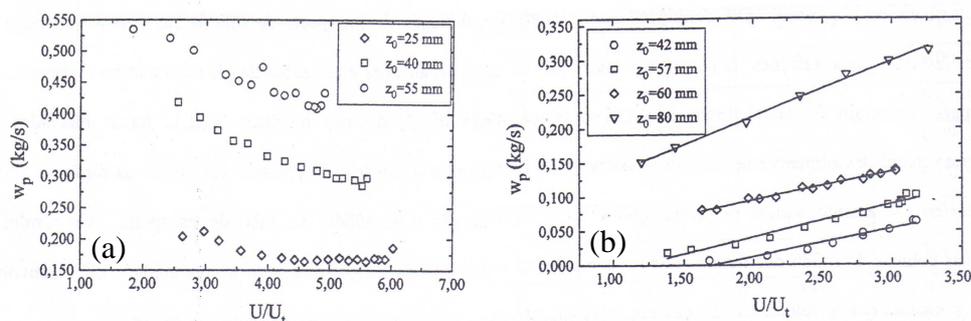


Figura 2.11 – Vazões de sólidos em função da velocidade adimensional do ar (Ferreira, 1996). Sólidos: esferas de vidro de 1,10 mm ($U_t = 7$ m/s). (a) Sem bocal; (b) Com bocal.

Já, quando há um bocal de redução o ar de transporte entra como um jato no sistema, minimizando o desvio para a região anular, e modificando a relação entre o ar de transporte e a vazão de sólidos, que passa a ser crescente

(Figura 2.11-b). Entretanto as vazões de sólidos são reduzidas, concluindo que a perda de carga adicional devido ao bocal reduz as vazões de ar escoando no leito, e, conseqüentemente, os valores de vazões de sólidos são menores.

2.4.4– Alimentador horizontal

De uma maneira geral, pode-se afirmar que nos sistemas pneumáticos verticais, a introdução da fase particulada ocorre majoritariamente na porção inferior do trecho ascendente. Se essa conexão for perpendicular, há a necessidade de uma força de impulsão no alimentador para que o sólido adentre o leito; já no caso de conexões inclinadas, o peso das partículas é que age como força impulsora.

Na Figura 2.12, tem-se de forma esquemática, a decomposição da força peso de uma partícula nas direções tangente e normal dentro do alimentador tubo inclinado. Num plano inclinado, ao mover-se um objeto que sobe a rampa, a força total aplicada para movimentá-lo é menor por uma distância maior, em comparação a um plano vertical. Já se um objeto desce um plano inclinado, por exemplo, os mesmos princípios ainda são aplicados, o que implica que apenas uma componente da força peso contribuirá para o escorregamento do objeto.

Assim, pode-se afirmar que para os sistemas de alimentação de sólidos a aplicação de uma força maior (nesse caso, a força peso) que admitirá uma maior capacidade de inserção de partículas, e, conseqüentemente, uma vazão de sólidos

transportada maior é bastante interessante. A partir desse resultado surge a motivação para alimentar partículas num leito vertical num trecho de tubulação horizontal, ou seja, um alimentador horizontal.

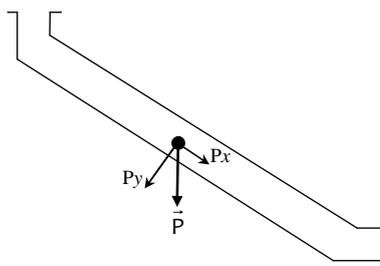


Figura 2.12 – Decomposição da força peso de uma partícula dentro do alimentador tubo inclinado.

Além do aumento da vazão de sólidos, a combinação do alimentador horizontal com uma válvula guilhotina permite um aumento do intervalo de vazões no sistema. Entretanto, como pontos negativos têm-se o fato de que tal configuração pode aumentar a perda de carga do leito, já que aumenta no percurso um acessório (a curva que torna o escoamento horizontal em vertical), levando ao aumento do custo operacional, além de favorecer a degradação do material manuseado, principalmente no caso de produtos quebradiços e friáveis.

Rosa *et al.* (2003), num estudo para caracterização e análise de um leito pneumático vertical aplicado no transporte de farinha de arroz, utilizaram a alimentação de sólidos horizontal por meio de um silo alimentador, representado na Figura 2.13. Para controlar a vazão de sólidos, utilizaram anéis com aberturas entre 5 e 11 mm de diâmetro na base do silo. Os valores de taxa de circulação de sólidos alcançados foram de 0,534 kg/h a 46,2 kg/h com vazões de ar entre 72

m^3/h e $216 \text{ m}^3/\text{h}$. Para o anel com abertura de 11 mm, a vazão de sólidos descarregada no leito foi maior que a capacidade de transporte, levando ao colapso do sistema. Os autores, todavia, não argumentaram sobre a escolha do tipo de configuração de alimentação de sólidos aplicada.

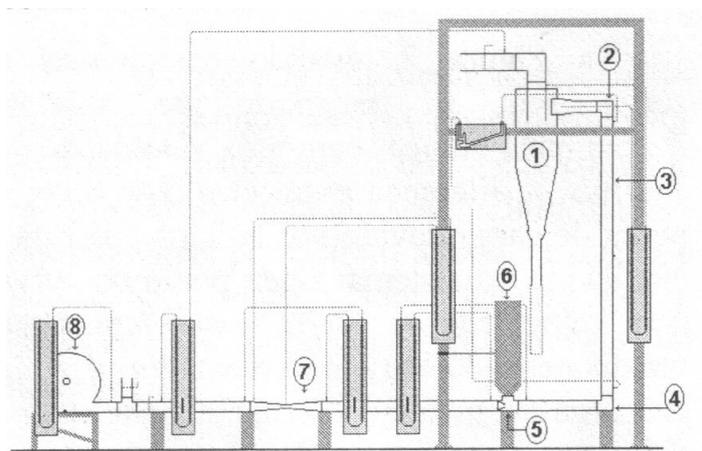


Figura 2.13- Leito pneumático vertical com alimentação horizontal utilizado no estudo de Rosa *et al.* (2003). (1) - ciclone; (2) e (4) - cotovelo 90°; (3) - riser; (5) alimentador; (6) silo alimentador; (7) Venturi; (8) ventilador.

2.5 – Bocais de entrada em sistemas de transporte pneumático

A utilização de bocais em sistemas gás-sólido é uma prática já consagrada para a melhoria da operação de sistemas. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Olazar *et al.* (1992), que testaram cinco diferentes tipos de bocais na entrada de um leito de jorro (Figura 2.14), a fim de identificar a melhor configuração para a estabilidade da operação. Seus resultados confirmam a influência significativa da

configuração do bocal nesse quesito e aponta a configuração do bocal n° 5 como o de melhor resultado, ou seja, operação mais estável.

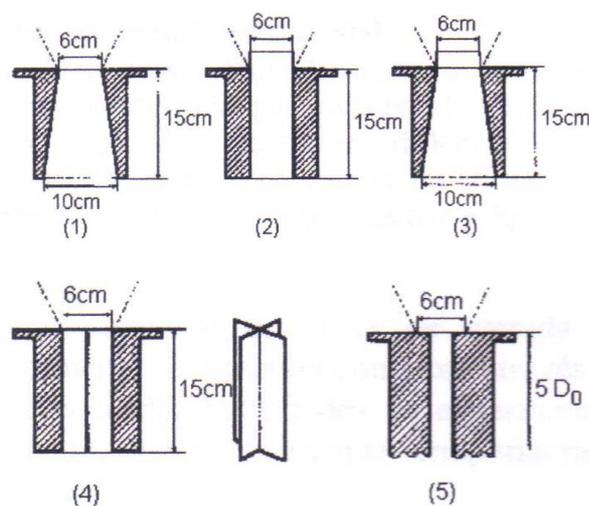


Figura 2.14 – Bocais de entrada avaliados por Olazar *et al.* (1992), para um leito de jorro.

Posteriormente, Rosa e Freire (2008) avaliaram o impacto de três diferentes modelos de bocais (Figura 2.15) na fluidodinâmica de um leito de jorro. Confirmaram a influência desses na estabilidade da operação como já estabelecido por Olazar *et al.* (1992). Além disso, os autores mostraram que a influência se estende para as regiões de jorro de um sistema e a não alteração da velocidade de jorro mínimo com a configuração do bocal de entrada.

Para sistemas de transporte pneumático essa prática é também utilizada, especialmente quando os alimentadores de sólidos são do tipo não-mecânico (Osti, 2003). O principal objetivo é a melhoria da estabilidade da operação, através de minimização de escape de ar de transporte pelo ponto de inserção de sólidos.

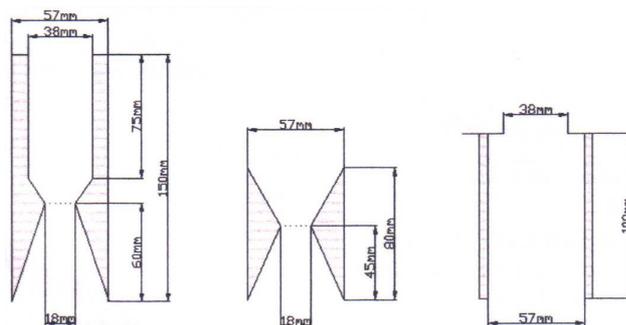


Figura 2.15 – Bocais de entrada avaliados por Rosa e Freire (2008), para um leito de jorro.

No estudo de Silva *et al.* (1996), um bocal com grau de redução de 42% (53 mm \rightarrow 22 mm) (Figura 2.16) foi inserido no ponto de alimentação de gás de transporte num leito com alimentador do tipo jorro. Com isto os autores conseguiram minimizar a instabilidade de operação e aumentar a reprodutibilidade dos dados experimentais. Como consequência da presença do bocal, foi observada ainda uma redução significativa do comprimento de entrada. A partir desses resultados, todos os trabalhos subseqüentes avaliaram a possibilidade da aplicação do bocal redutor para este alimentador, como o já citado estudo de Ferreira (1996), onde a presença do bocal mudou significativamente a variação da vazão de sólidos em função da velocidade do ar de transporte (veja Figura 2.11).

Já Osti (2003) avaliou o grau de redução do bocal redutor num alimentador tipo jorro, operando num leito pneumático vertical com diâmetro de tubulação igual a 24,3 mm e 1,5 m de altura. Neste estudo demonstrou-se que para cada tipo de bocal há um comportamento fluidodinâmico, e que o grau de restrição desse bocal é decisivo na definição desse comportamento, já que ele pode evitar parcial ou totalmente o escape de gás de transporte pela região anular do alimentador tipo

gorro. Esse trabalho confirma novamente a redução do comprimento de entrada quando há a presença de bocais.

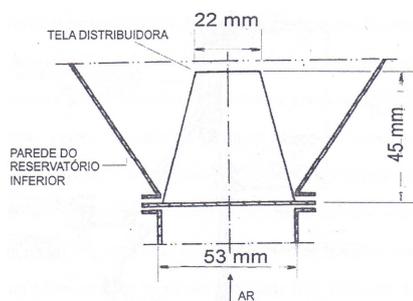


Figura 2.16 – Bocal redutor utilizado por Silva *et al.* (1996) e Ferreira (1996).

Lopes (2007) comparou duas configurações de bocais, o bocal redutor e o bocal Venturi (Figura 2.17), utilizando-as num “loop” pneumático com alimentador tipo tubo inclinado. Apesar do princípio fundamental em ambas os bocais ser o mesmo (constricção), a diferença entre eles está na forma como essa se dá. No bocal redutor, a redução é brusca, levando à formação de uma ‘vena contracta’ no centro da tubulação. Já no Venturi, a redução e a recuperação da área de escoamento ocorrem de forma gradativa. Isso faz com que o escoamento ao longo da redução seja menos oscilatório, garantindo assim a recuperação de boa parte da pressão perdida durante a passagem na constricção, fato característico do dispositivo Venturi.

Também observou que as configurações afetam significativamente a fluidodinâmica e estabilidade do leito. Nesse mesmo estudo, foi avaliado ainda o grau de restrição da “garganta” do bocal Venturi, que como no trabalho de Osti (2003), mostrou-se um dado relevante.

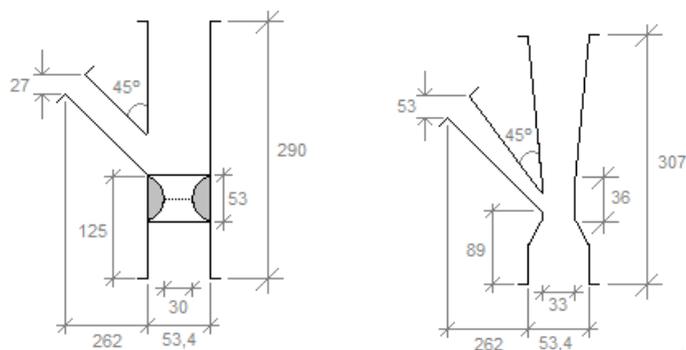


Figura 2.17 – Bocais avaliados por Lopes (2007).

A análise desta revisão destaca a relevância da configuração do alimentador na fluidodinâmica do leito, especialmente na região de entrada. Assim, propostas de mudança nesse dispositivo devem ser avaliadas de forma criteriosa, já que a alimentação interfere na viabilidade econômica e técnica, na eficiência do transportador, além de ter que garantir uma inserção de sólidos contínua e sem oscilações (Ferreira, 1996). Nesse sentido, este estudo é proposto a fim de avaliar a influência da configuração de alimentação dos sólidos de um “loop” pneumático na fluidodinâmica do sistema. As alterações foram realizadas no tipo de alimentador de partículas e também com a inserção de bocais de entrada restritivos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais empregados e a metodologia utilizada para a realização da análise fluidodinâmica gás-sólido do “loop” pneumático, usando diferentes configurações de alimentação de sólidos.

3.1 – Equipamento

Para a realização desse estudo foi empregado um “loop” como apresentado na Figura 3.1. Este sistema é constituído por um trecho ascendente com 3,54 m de comprimento (1), duas curvas de 90° acopladas em série, alterando a direção do escoamento em 180° (2) e trecho descendente de 2,1 m (3). Todo o leito é feito com tubo em ferro galvanizado com diâmetro interno de 53,4 mm. Ao final do tubo de transporte, há um reservatório de sólidos de seção cilíndrica e base cônica, com capacidade de carga de sólidos média de 50 kg (4). Entre a porção inferior desse silo e o ponto de inserção de sólidos (5) pode ser utilizado qualquer um dos alimentadores construídos para este trabalho.

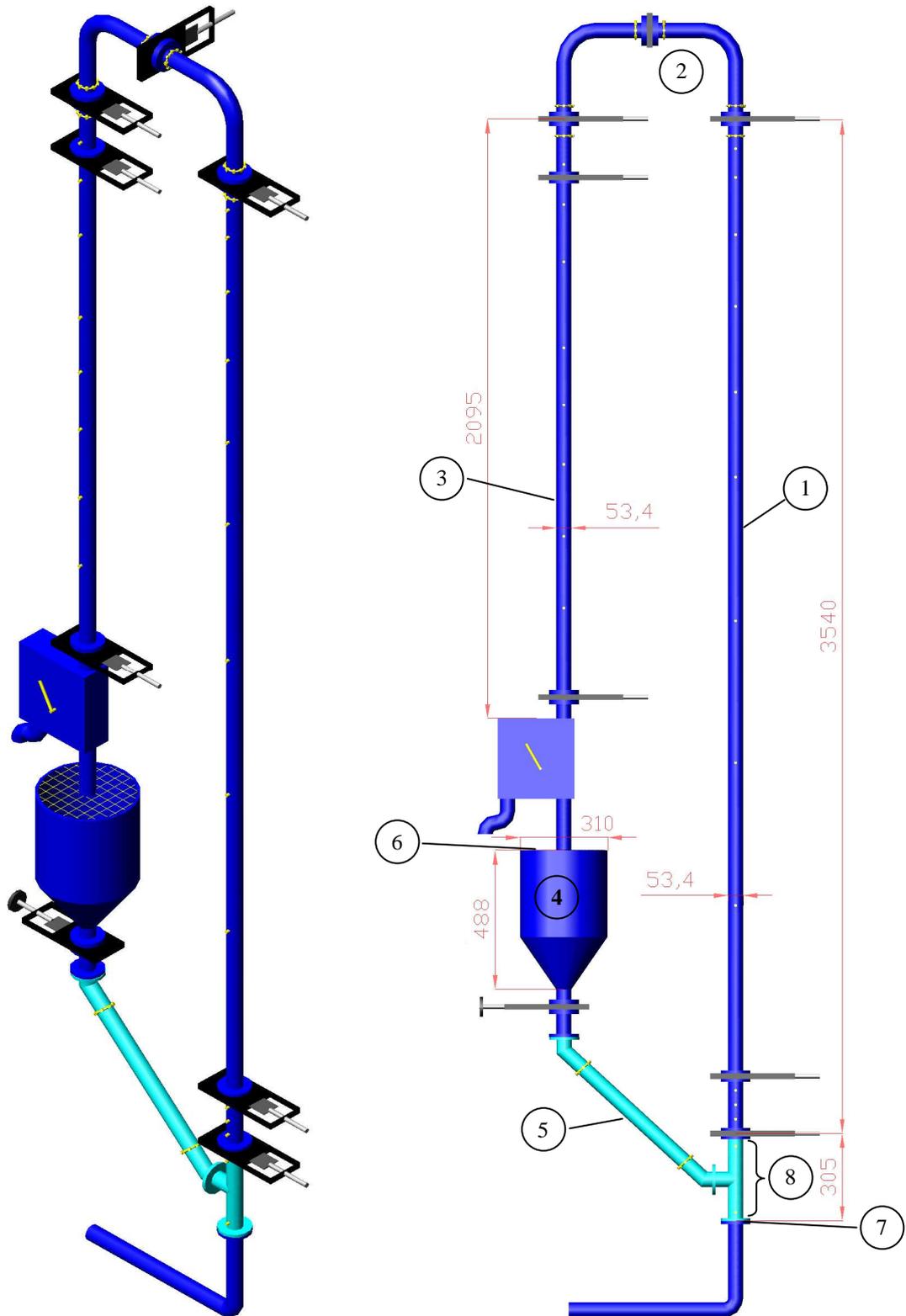


Figura 3.1 – “Loop” pneumático. Medidas em mm.

Ao injetar ar de transporte na base do trecho ascendente, ele se mistura aos sólidos descarregados nesta linha pelo alimentador conectado ao reservatório, sendo essa mistura transportada ascendentemente pela tubulação, escoando através das curvas e retornando na seção descendente, onde os sólidos são descarregados novamente no reservatório, estabelecendo um movimento cíclico. O ar de transporte é liberado pela porção superior do reservatório de sólidos (6), que é aberta para o ambiente, protegida apenas por uma tela de aço inox com malha 0,5 mm para evitar perda de partículas.

Para a alimentação da fase fluida foi instalado um ventilador axial de 7,5 HP. Este é conectado ao leito através de um tubo horizontal, nos quais estão instalados os dispositivos de medida e ajuste da vazão de gás de transporte, que serão comentados posteriormente. A vazão de ar máxima fornecida pelo equipamento é de aproximadamente 380 m³/h (temperatura média do ar igual a 70°C), que para uma tubulação de diâmetro de 53,4 mm, equivale a uma velocidade máxima do ar de 47 m/s. Para uma distribuição de ar mais homogênea no “loop”, entre o ponto de conexão da alimentação de ar e o bocal de entrada (7) foi instalado uma tela de proteção com malha de 0,5 mm, feita em inox.

Neste trabalho o termo configuração de alimentação compreende o formato de duas regiões do sistema: o alimentador externo juntamente com o trecho da tubulação de entrada no *riser* onde as fases fluida e sólida se misturam, denominado como bocal de entrada (8). Assim, devido à adaptação realizada no sistema através de conexões flangeadas, a configuração da entrada pode adquirir diferentes formatos. Para este estudo, os alimentadores externos usados estão representados esquematicamente na Figura 3.2.

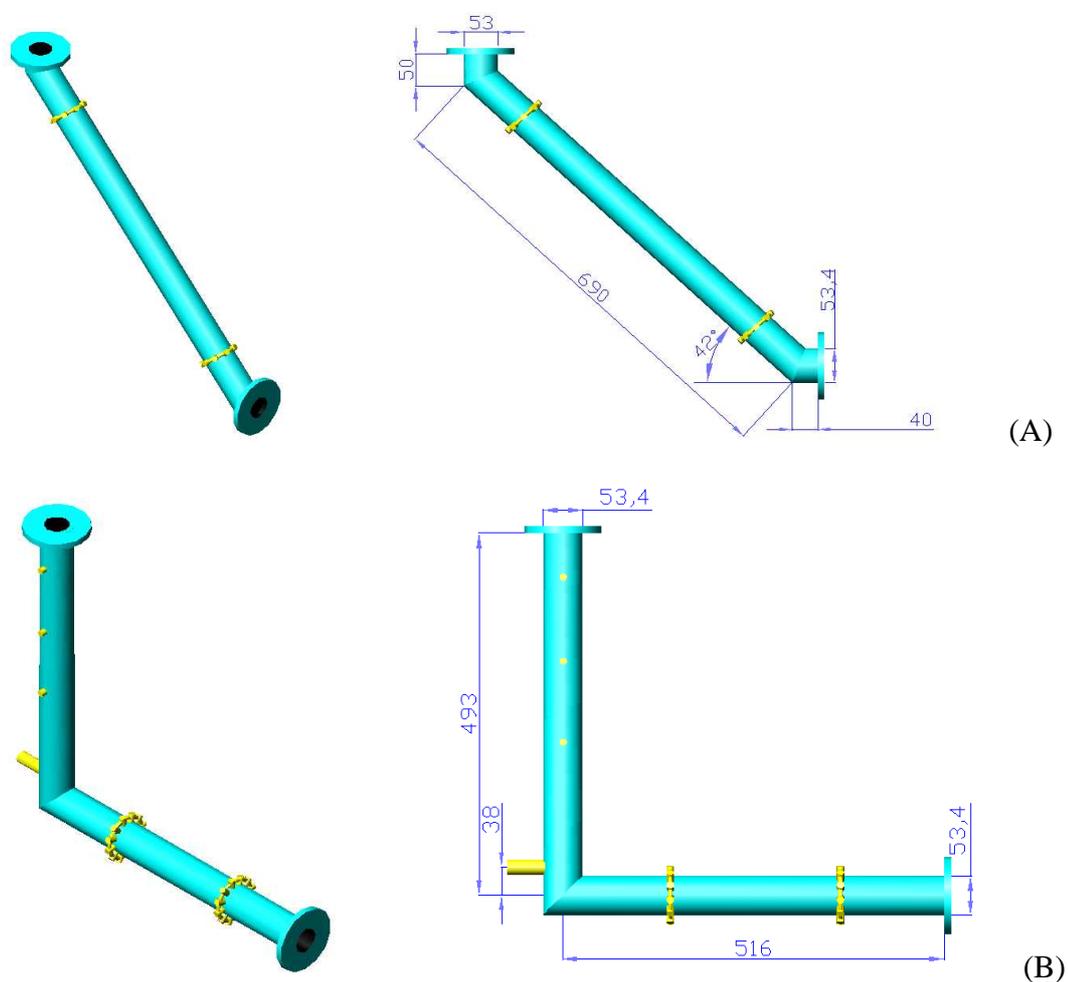


Figura 3.2 – Alimentadores externos. (A) Tubo inclinado; (B) Válvula-L. Medidas em *mm*.

O alimentador Tubo inclinado (Figura 3.2-A) é constituído de um trecho de tubo em ferro galvanizado com diâmetro de 53,4 mm e 69 cm de comprimento, com inclinação de 42° em relação à horizontal. A vazão de sólidos alimentada é regulada por uma guilhotina manual com abertura circular de 53,4 mm, localizada na junção entre o alimentador e o reservatório, o que permite o estabelecimento da

área de passagem dos sólidos, que alcança um valor máximo de 22,4 cm², quando a guilhotina está totalmente aberta.

Nas extremidades, há pequenos segmentos de tubo vertical e horizontal, respectivamente, devido a necessidade de adequações estruturais ao sistema. Em relação ao trecho horizontal, a construção foi realizada a fim de garantir o menor comprimento possível (4 cm) e assim reduzir ao máximo sua influência na alimentação de sólidos. Entretanto, esse estudo não avaliou o impacto efetivo desse tipo de conexão em relação à utilizada por Lopes (2007), onde o sistema alimentador-bocal era uma peça de usinagem integrada (Figura 2.15).

A válvula-L deste estudo (Figura 3.2-B) possui um tubo de descida de 49,3 cm e seção horizontal com 51,6 cm de comprimento, sendo essas seções confeccionadas com tubulação também em ferro galvanizado e diâmetro de 53,4 mm. O funcionamento da “L” é realizado através da injeção de aeração auxiliar na porção inferior do tubo de descida, bem próximo à curva. Esse ponto está localizado a 3,8 cm do centro da seção horizontal, seguindo recomendações de Knowlton e Hirsan (1978).

Com estes alimentadores externos, três configurações de bocais de entrada podem ser usados: sem restrição, redutor e Venturi, apresentados na Figura 3.3, sendo o grau de restrição de 38,2%, tanto para o bocal redutor quanto o bocal Venturi.

O bocal redutor (Figura 3.3-B) é, de fato, uma peça circular com cerca de 7,5 cm de altura e diâmetro nas extremidades muito próximo ao diâmetro interno da tubulação. Esse bocal é usinado de forma que na seção central o diâmetro seja 33 mm, sendo as regiões entre as extremidades e esse centro inclinadas. O bocal

reductor é então acoplado internamente ao bocal sem restrição (Figura 3.3-A) imediatamente anterior à abertura lateral de entrada dos sólidos.

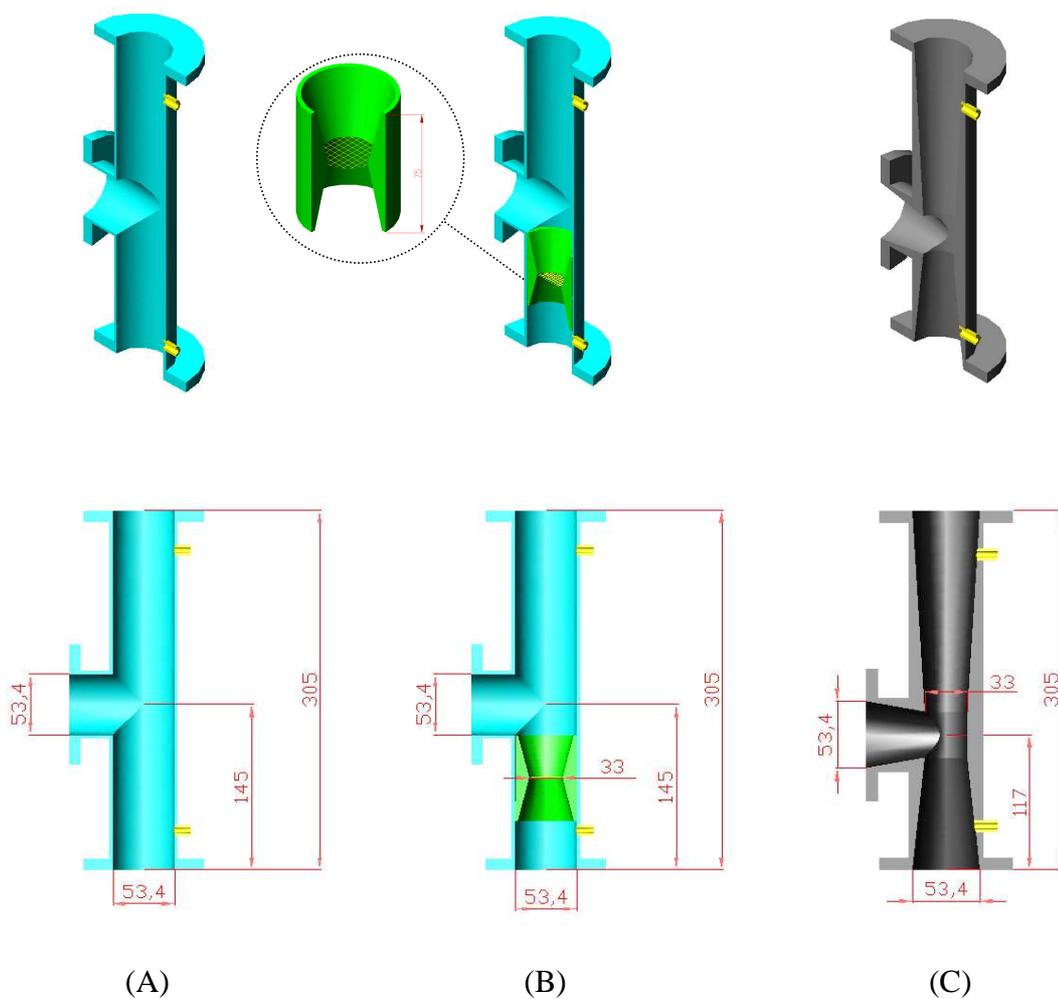


Figura 3.3 – Bocais de entrada. (A) Bocal sem restrição; (B) Bocal reductor; (C) Bocal Venturi. Vista corte longitudinal. Medidas em *mm*.

Diferentemente, o bocal Venturi (Figura 3.3-C) é uma peça compacta usinada com 30 cm de altura, que agrega o trecho de redução e o de mistura das fases. As angulações de cada seção do Venturi seguem os critérios de projeto destes dispositivos, apresentados na Figura 3.4. Nesse bocal, o ponto de inserção

de sólidos está localizado na região cilíndrica central, comumente chamada “*garganta*” de um Venturi. Para a abertura desta entrada, cuidados especiais foram tomados para que a condição de escoamento dentro do equipamento não fosse significativamente alterada. Testes realizados garantem que, mesmo após a abertura lateral na “*garganta*”, ela ainda mantém suas características de região com pressão negativa.

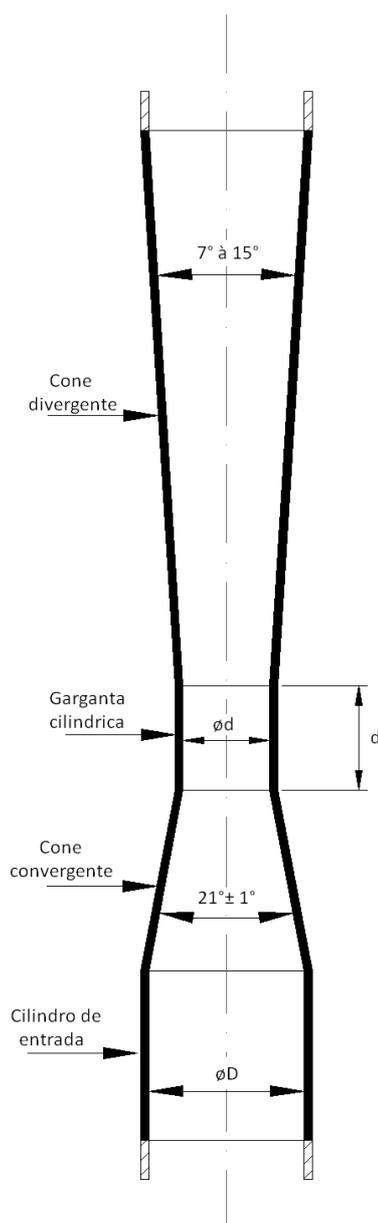


Figura 3.4 – Dimensões básicas de um tubo Venturi. (Delmée, 1981).

Juntamente às configurações comentadas previamente, foram avaliadas ainda a aplicação de mais dois alimentadores no intuito de avaliar formas distintas de inserção da fase particulada, além da entrada lateral em trecho vertical.

O primeiro deles é o chamado alimentador tipo leito de jorro, desenvolvido e analisado sistematicamente no Centro de Secagem da UFSCar (Ferreira, 1991; Ferreira e Freire, 1992; Ferreira, 1996; Silva *et al.*, 1996; Costa *et al.*, 2004; Sousa, 2009). O alimentador tipo jorro utilizado possui um corpo cilíndrico de 58 cm de altura, diâmetro de 280 mm e base cônica com ângulo de 60°(Figura 3.5). A entrada de sólidos advindos do reservatório ocorre lateralmente a uma altura de 58,1cm da base do alimentador. Estudos anteriores deste tipo de alimentador ressaltam a necessidade da utilização de um bocal redutor na entrada de ar, melhorando a estabilidade e operação do alimentador. Aqui, o bocal redutor empregado para este alimentador é o mesmo bocal redutor comentado anteriormente, com redução de 33 mm. A distância z_0 , foi fixada neste estudo com um valor de 45 mm.

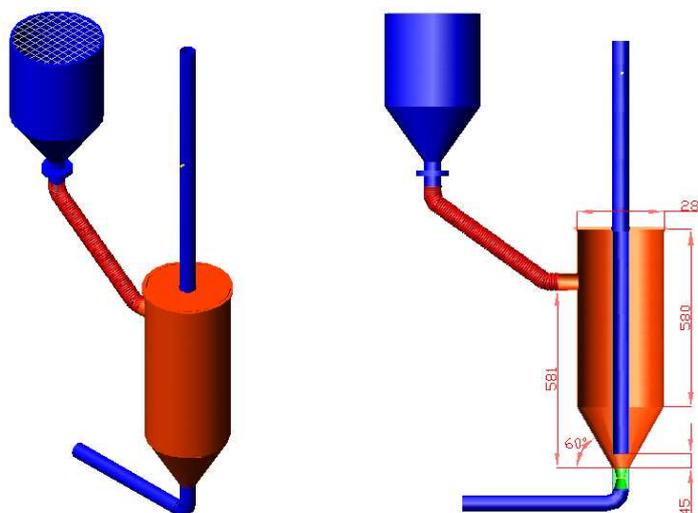


Figura 3.5 – Alimentador leito de jorro. Medidas em *mm*.

A última configuração considerada é a alimentação horizontal, representada na Figura 3.6. Aqui, a inserção da fase sólida ocorre no trecho horizontal da tubulação que fornece ar de transporte ao sistema, 60,5 cm a jusante de uma curva de 90°. O tubo de descida que conecta o reservatório de sólidos ao ponto de entrada tem 87,2 cm de altura e diâmetro de 53,4 mm. A descarga de sólidos na seção horizontal é realizada no bocal de entrada Venturi deste estudo, a fim de prevenir o acúmulo de sólidos na entrada e obter maiores valores de vazões de sólidos e uma melhor mistura das fases. A regulação da abertura do alimentador é realizada através de uma guilhotina manual instalada na seção inicial do tubo de descida. Essa guilhotina é a mesma utilizada para o tubo inclinado.

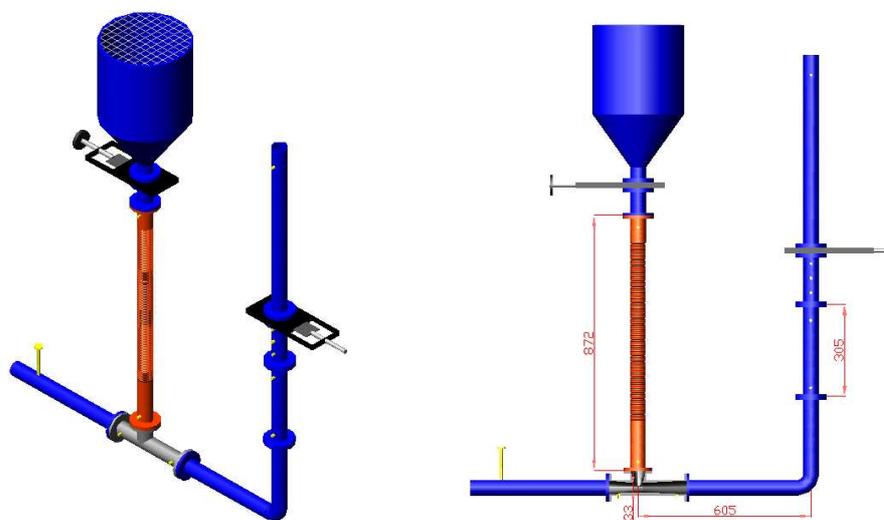


Figura 3.6 – Alimentação horizontal. Medidas em *mm*.

Diante das possibilidades de sistemas de alimentação de sólidos citadas, a combinação dos dispositivos descritos permitirá avaliar a relevância de alguns parâmetros como o tipo de alimentador externo, a utilização de bocais restritivos e

a forma de inserção da fase particulada para as respostas fluidodinâmicas de um leito pneumático.

3.2 – Materiais

O sólido escolhido como material particulado no escoamento bifásico avaliado aqui foi esferas de vidro com diâmetro médio de 1 mm e densidade igual a 2500 kg/m^3 . A velocidade terminal desta partícula é de 7,8 m/s, calculada pela correlação de Pettyjohn e Christiansen (1948). Este sólido pertence ao grupo B da classificação de Geldart (1973), no qual as partículas são qualificadas por ter valores de massa específica e diâmetro intermediários e fluidização heterogênea para velocidades logo acima à da mínima fluidização (Oliveira, 2001).

Trata-se ainda de um dos tipos de inerte mais aplicado em estudos fluidodinâmicos, por ser um material esférico, não poroso, além de não quebradiço.

3.3 – Técnicas de medidas

Para a realização do estudo fluidodinâmico de cada configuração do “loop” pneumático, as variáveis manipuladas no experimento foram às velocidades (ou vazões) de ar de transporte e o ajuste de vazão de sólidos. E como respostas desse sistema para a verificação do comportamento gerado foram

obtidas as vazões de sólidos transportadas e a pressão ao longo do leito. As técnicas utilizadas para a realização dessas medidas estão detalhadas nos próximos itens.

3.3.1- Velocidade do ar de transporte

Para o ajuste da vazão de ar alimentada ao sistema foram dispostas duas válvulas manuais tipo gaveta, localizadas logo após o soprador sendo que uma se encontra na própria linha de alimentação, enquanto a outra se localiza num ‘*by pass*’ após a primeira válvula. O valor dessa vazão é determinado por um medidor tipo Venturi, localizado à frente do desvio e conectado a um manômetro tipo tubo em “U”, onde a leitura da queda de pressão (ΔP) é realizada. O arranjo dos dispositivos de ajuste e medida está representado na Figura 3.7. Com o valor de ΔP determinado, juntamente com a informação da temperatura do ar (T) no escoamento, através da relação vazão e queda de pressão dada pela Equação 3.1, calcula-se a vazão volumétrica de ar, válida para o intervalo de $0,5 \leq \Delta h \leq 93$ cm col. H₂O.

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

onde: Q_f = vazão volumétrica de ar (m³/min); Δh = diferença de altura entre as colunas de água do manômetro de tubo em U (cm col. H₂O); T = temperatura do sistema de alimentação de ar (K) e P_{atm} = pressão atmosférica = 1034 cm col.H₂O.

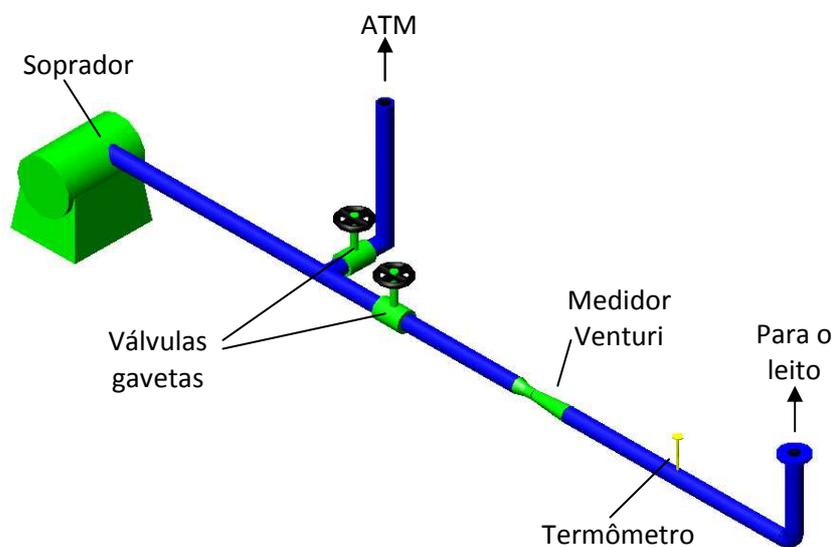


Figura 3.7 – Sistema de alimentação de ar de transporte.

Testes preliminares foram realizados a fim de verificar a estabilidade do sistema de fornecimento de ar. Para o “loop” pneumático com configuração de alimentação sendo o tubo inclinado e o bocal de entrada sem restrição, uma condição de operação com abertura do alimentador na condição máxima ($S=22,4 \text{ cm}^2$) e vazão volumétrica de ar inicial em torno de $178 \text{ m}^3/\text{h}$ (ou 22 m/s) foi fixada. Ao longo de uma hora e meia, os valores da vazão foram monitorados, intercalados por um tempo de 5 minutos. O resultado, apresentado na Figura 3.8, mostra um fornecimento de ar que possui um período de acomodação de aproximadamente 30 minutos. A partir desse ponto os valores de vazão são praticamente constantes, com variação máxima de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ (variação média de $1,2\%$). Apesar desse comportamento inicial, é notável que a alimentação de ar é estável, sem oscilações bruscas.

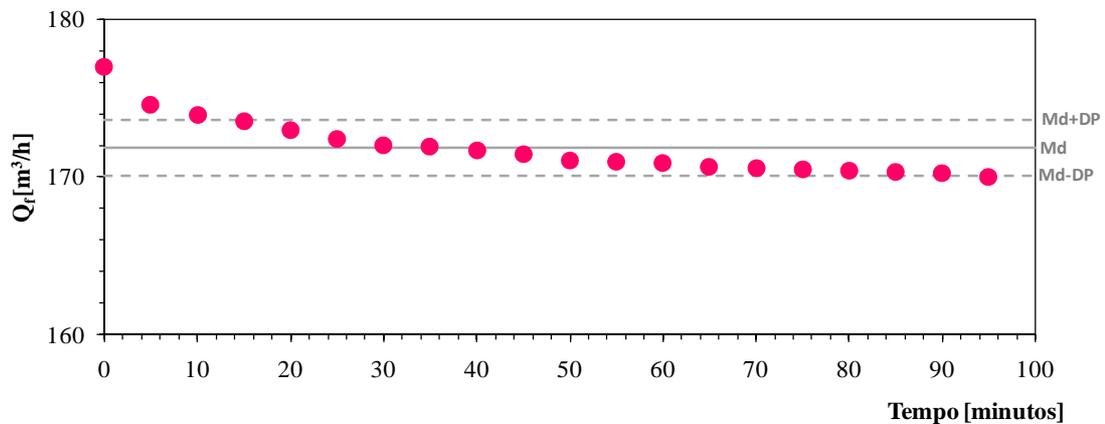


Figura 3.8 – Vazão de ar alimentado ao sistema ao longo do tempo.

A partir de uma primeira análise das condições operacionais das configurações, foram estipulados valores fixos de vazão de ar de transporte a serem utilizados durante os experimentos em cada caso. Na Figura 3.9 estes valores estão indicados, em termos de velocidade do ar. Vale destacar que a velocidade máxima alcançada mostrou-se dependente do tipo de configuração utilizada durante a operação. Esse comportamento será avaliado e discutido no próximo capítulo.

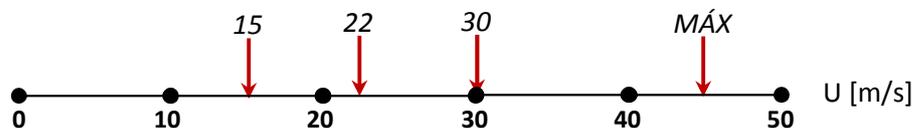


Figura 3.9 – Valores pré-definidos para a velocidade do ar de transporte.

Em alguns trabalhos que abordam transporte pneumático, a vazão de ar efetiva é considerada como a vazão alimentada descontada da vazão desse ar que

escapa pelo alimentador de sólidos. Essa perda normalmente é determinada através da queda de pressão medida no alimentador ou tubo de reciclo, aplicada à equação de Forcheimer (Equação 3.2) (Ferreira, 1996; Patrocínio, 2005). Nesse estudo, a vazão de ar efetiva não foi considerada, ou seja, sempre que se fala sobre vazão de ar nas discussões deste trabalho, a vazão de ar considerada é a vazão de ar nominal alimentada ao sistema. Entretanto, a vazão de escape de gás pelo alimentador, foi estimada pela Equação 3.2, pois é um dado importante para explicar comportamentos observados diante das diferentes configurações de alimentação.

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

Nessa equação, o valor de permeabilidade do leito κ foi estimado pela equação de Kozeny-Carman (Equação 3.3), considerando a porosidade do leito de partículas dentro do alimentador (ε) igual a 0,4. Assim o valor de B deve ficar entre 4 e 5 (valor utilizado B = 4). O fator c é calculado pela correlação da Equação 3.4, com $\Omega = 0,14$ para os intervalos $0,35 \leq \varepsilon \leq 0,5$ e $10^{-6} \leq \kappa \leq 10^{-4} \text{ cm}^2$.

$$\kappa = \frac{(d_p \phi)^2 \varepsilon^3}{36B(1-\varepsilon)^2} \quad (3.3)$$

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

3.3.2 – Ajuste de vazão de sólidos dos alimentadores

Em relação aos alimentadores, as técnicas de ajuste da quantidade de sólidos alimentada ao sistema são características de cada configuração, sendo que o leito está adaptado a todas elas. Como critério experimental, para cada um dos alimentadores foram pré-fixadas duas aberturas, sendo uma a mínima para o transporte de sólidos estável e a outra a máxima possível, garantindo nas duas situações uma operação em regime diluído.

O tubo inclinado tem a vazão de sólidos controlada por uma válvula guilhotina manual (Figura 3.10-A) acoplada no ponto de junção entre o alimentador e o reservatório de sólidos. Uma abertura com área de seção transversal igual a $2,9 \text{ cm}^2$ (Figura 3.10-B) foi colocada como o limite inferior, porque com valores abaixo de $2,9 \text{ cm}^2$ não há alimentação de sólidos no leito; a abertura máxima tem uma área igual a $22,4 \text{ cm}^2$ (guilhotina totalmente aberta) (Figura 3.10-C).

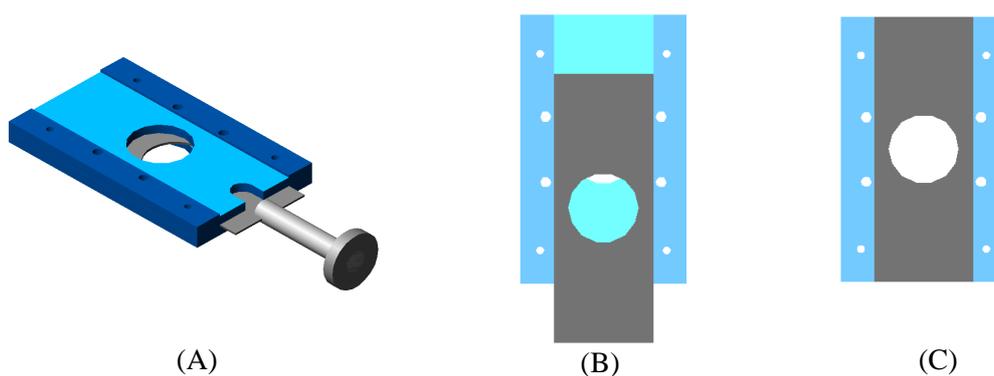


Figura 3.10 – Válvula guilhotina manual para o tubo inclinado. (A) Válvula em perspectiva; (B) Abertura mínima ($2,9 \text{ cm}^2$); (C) Abertura máxima ($22,4 \text{ cm}^2$).

Para a válvula-L, a inserção de ar no ponto de aeração auxiliar é que controla a vazão de sólidos. Essa aeração é fornecida por um compressor do tipo tambor e a vazão desse ar é medida através de um rotâmetro instalado entre o compressor e o ponto de injeção. Para o ajuste da vazão havia uma válvula manual do tipo gaveta anterior ao rotâmetro. Essa disposição está apresentada na Figura 3.11.

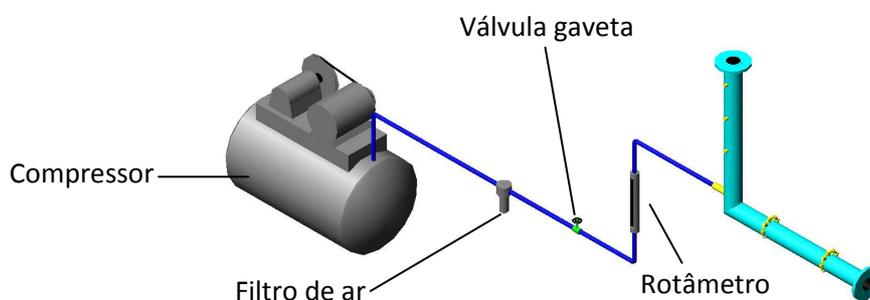


Figura 3.11 – Sistema de inserção de aeração auxiliar para a válvula-L.

A vazão máxima fornecida pelo compressor é de $12 \text{ m}^3/\text{h}$. Entretanto, trabalhar com a alimentação de aeração auxiliar máxima nesse caso é desaconselhado, porque compressores do tipo tambor possuem um reservatório que armazena o gás comprimido e é desse vaso que sai o ar alimentado ao sistema. Quando a válvula gaveta é totalmente aberta, devido ao esvaziamento acelerado do reservatório, nota-se oscilação elevada no valor da vazão de ar alimentada com o tempo. Para evitar que essa oscilação aconteça, prejudicando o procedimento experimental, dois valores para a vazão de aeração foram pré-definidos para as condições avaliadas: uma aeração mínima igual a $7 \text{ m}^3/\text{h}$, porque

valores abaixo desse são insuficientes para movimentar as partículas dentro da “ L ”; e uma aeração máxima igual a $10 \text{ m}^3/\text{h}$ (83% da vazão máxima possível).

Para o alimentador tipo jorro o ajuste da vazão de sólidos depende da distância entre o ponto de entrada do ar no leito de jorro e o início do tubo de transporte, a chamada distância z_0 (Figura 3.12). Em ensaios preliminares, o valor fixado para z_0 foi igual a 45 mm, sendo esta a maior distância possível entre o ponto de entrada do ar e a tubulação de transporte que permitiu uma alimentação de sólidos no “*loop*” pneumático de forma satisfatória, sendo esses resultados os apresentados nesse estudo.

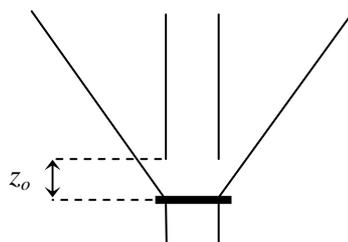


Figura 3.12- Representação da entrada do alimentador leito de jorro (sem escala).

Como já citado neste capítulo, o ajuste da abertura do alimentador para a situação de alimentação horizontal também é feito pela inserção da válvula guilhotina manual entre a parte superior do tubo de descida e o reservatório de sólidos. A guilhotina é a mesma utilizada para o caso com tubo inclinado; entretanto as aberturas mínima e máxima são distintas, já que o balanço de forças agindo sobre a massa de partículas é diferente em cada caso. Aqui, como a força peso tem ação total sobre a alimentação, a variação da abertura da guilhotina é bem menor, com áreas da seção transversal de $1,4 \text{ cm}^2$ e $1,8 \text{ cm}^2$. Quando a área

disponível é maior que $1,8 \text{ cm}^2$, a carga de sólidos é muito elevada e o sistema passa a transportar na forma de pulsos, tornando o escoamento muito instável (regime denso). Medidas nessa condição não foram realizadas devido às capacidades máximas da instrumentação de medição de pressão serem inadequadas para operações em regime denso.

As informações a respeito do ajuste da vazão de sólidos dos alimentadores apresentadas anteriormente, estão sintetizadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Condições máximas e mínimas para os alimentadores deste trabalho.

<i>ALIMENTADOR</i>	<i>Condição Mínima</i>	<i>Condição Máxima</i>
<i>Tubo inclinado</i>	$S = 2,9 \text{ cm}^2$	$S = 22,4 \text{ cm}^2$
<i>Válvula-L</i>	$Q_{\text{aer}} = 7 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_{\text{aer}} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$
<i>Leito de jorro</i>	$z_o = 45 \text{ mm}$	
<i>Alimentação horizontal</i>	$S = 1,4 \text{ cm}^2$	$S = 1,8 \text{ cm}^2$

3.3.3 – Vazão mássica de sólidos

Para a medida da vazão de sólidos, está instalada entre o trecho final do leito e o reservatório de sólidos uma caixa de amostragem, projetada para permitir o desvio da direção do escoamento através do acionamento de uma alavanca, apresentada de forma esquemática na Figura 3.13. O valor da vazão de sólidos é então obtido através da pesagem dos sólidos desviados para o amostrador, durante

um tempo de coleta determinado e medido com o uso de um cronômetro. Com esses dados, calculou-se a vazão mássica de sólidos através da seguinte equação:

$$W_s = \frac{\text{massa_coletada}}{\text{tempo_de_coleta}} \quad (3.5)$$

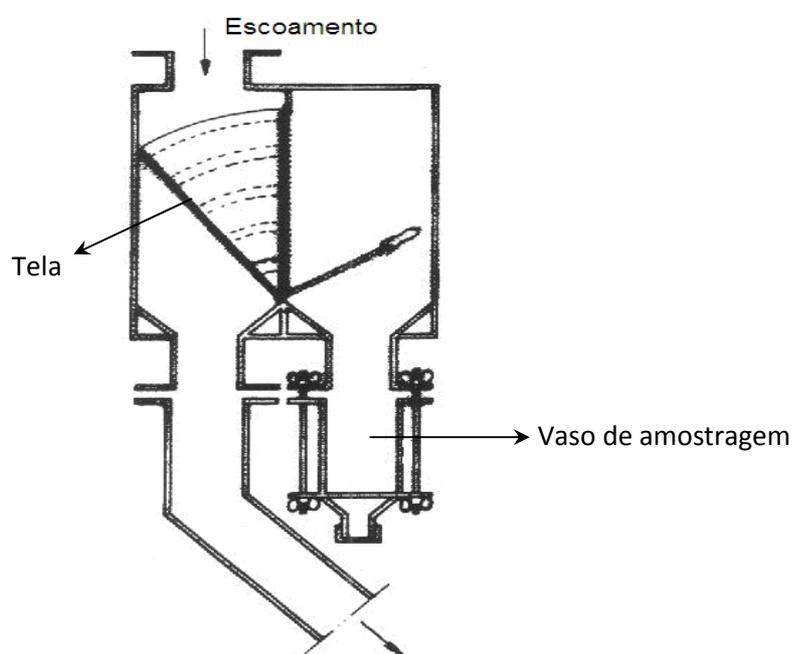


Figura 3.13 – Caixa de amostragem de sólidos.

No mesmo teste realizado a fim de verificar a estabilidade da alimentação de ar, foi avaliado também o comportamento da vazão de sólidos transportada no leito. Os resultados estão apresentados na Figura 3.14, onde se observa que as medidas de vazão de sólidos têm comportamento oscilatório $\pm 5\%$ ($\pm 1,2$ kg/h) em torno de um valor médio ($M_d = 27$ kg/h). Esses resultados foram considerados adequados para este estudo.

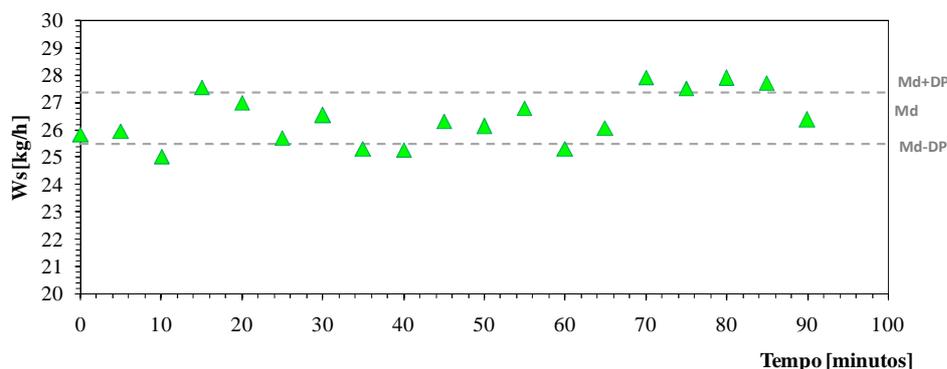


Figura 3.14 – Vazão de sólidos em função do tempo.

3.3.4- Pressão estática

O “loop” utilizado nesse estudo tem instalado ao longo de sua linha, 28 tomadas de pressão em todas as seções que o constituem (entrada, trecho ascendente, curva, trecho descendente). O primeiro ponto é localizado no início do bocal de entrada e o último, na porção final do trecho descendente. Há ainda pontos de medida de pressão nos alimentadores externos, com o objetivo de determinar o gradiente de pressão para estimativa do desvio de gás de transporte. Essas tomadas foram concebidas levando em considerações as recomendações de Satija *et al.*(1985).

Nos pontos presentes na curva de 180°, foram instalados anéis piezométricos (Kavassaki, 1985) com o objetivo de minimizar erros de medidas provocados pela não uniformidade do escoamento (Patrocínio, 2005). Os anéis foram utilizados ainda nas medidas de pressão no tubo inclinado, na seção horizontal da válvula-L e na tubulação que conecta o reservatório de sólidos e o leito de jorro.

Para padronizar a localização desses pontos e permitir a apresentação dos resultados de maneira simplificada, definiu-se uma variável ζ , que é a medida linear do leito pneumático, com a posição $\zeta = 0$ situada no ponto de conexão entre o bocal de entrada e a tubulação de ar e $\zeta = 6,69$ m na porção final do leito. A localização e valores de ζ dos pontos está indicada na Figura 3.15. Esses pontos são comuns para a maioria das configurações, exceto quando o alimentador é o leito de jorro, que, devido às adaptações necessárias, tem os cinco primeiros pontos eliminados. Para não perder o grau de detalhamento quando o alimentador tipo jorro é usado, outros três pontos foram colocados nas posições: $\zeta = 0,58, 0,73$ e $0,88$ metros.

Vale destacar as seguintes características do sistema, que serão importantes na análise dos dados: a alimentação dos sólidos ocorre entre as posições $0,03$ e $0,06$ m; o trecho ascendente está compreendido no intervalo $0,46 \text{ m} \leq \zeta \leq 3,79 \text{ m}$; a mudança de direção do escoamento ocorre entre os pontos $3,79 \text{ m}$ e $5,04 \text{ m}$ e o trecho descendente tem início a partir de $\zeta = 5,04 \text{ m}$.

Em relação à forma de obtenção da pressão estática durante os experimentos, podem-se definir duas etapas. Primeiramente, as pressões ao longo de todo o sistema foram obtidas através das medidas com manômetros tubo em “U” com água como fluido manométrico. Em virtude da técnica desta medida, sua sensibilidade não permite a obtenção de pontos com espaçamentos próximos. Assim, todas as medidas de pressão e vazão de sólidos foram realizadas apenas para as velocidades do ar destacadas na Figura 3.9. As configurações avaliadas nesta etapa foram com os alimentadores tubo inclinado e válvula-L acoplado aos bocais sem restrição, redutor e Venturi.

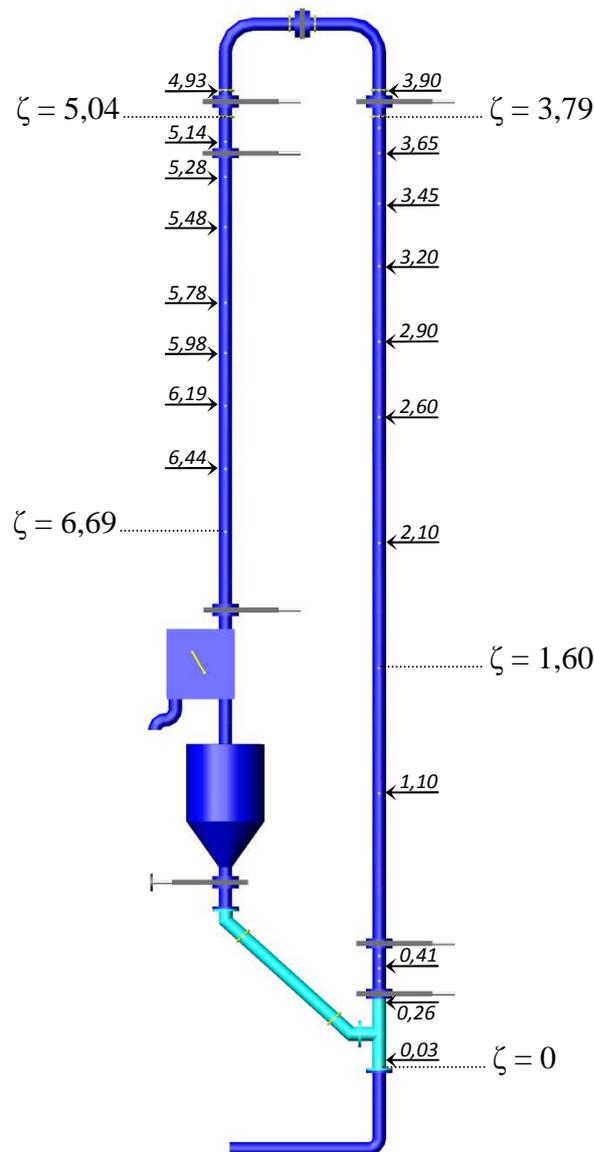


Figura 3.15 – Localização dos pontos de tomadas de pressão. Medidas em *m*.

Num segundo momento, um sistema de aquisição foi empregado, com instalação de sete transdutores de pressão nos pontos de medidas iniciais e no último do leito ($\zeta = 0,03, 0,26, 0,36, 0,41, 0,46, 1,10$ e $6,69$ metros). Essa medida com transdutor foi concebida a fim de melhorar a qualidade e detalhamento dos dados experimentais, especialmente na região de entrada, onde oscilações

importantes têm erro de medida aumentado devido às dificuldades de leitura quando os manômetros diferenciais em U são utilizados.

Os transdutores pertencem a série 600, fabricados pela AutoTran, sendo os dois primeiros pontos ($\zeta = 0,03$ e $0,26$ metros) com intervalo de 0-5 psi e demais de 0-1 psi. A aquisição desses dados foi realizada através de um módulo de aquisição de sinais analógicos NI9205 (32-Channel +/-10 V, 250 kS/s, 16-Bit Analog Input) acoplado à um sistema de aquisição cDAQ (cDAQ - 9172) e programas desenvolvidos em LabVIEW 7.1 *Express* (National Instruments), obtendo a pressão dos pontos em Pascal e o desvio padrão dessas medidas.

A amostragem foi de 10000 pontos num intervalo de 5 segundos (2000 Hz). Na Figura 3.16 os dados obtidos para uma medida do primeiro ponto de pressão no leito (situação mais crítica) com configuração tubo inclinado e bocal sem restrição estão apresentados, com valor médio de pressão de 102,26 kPa, e desvio padrão de 0,01 kPa. O comportamento e qualidade dos dados (desvio padrão pequeno) são representativos das demais medidas.

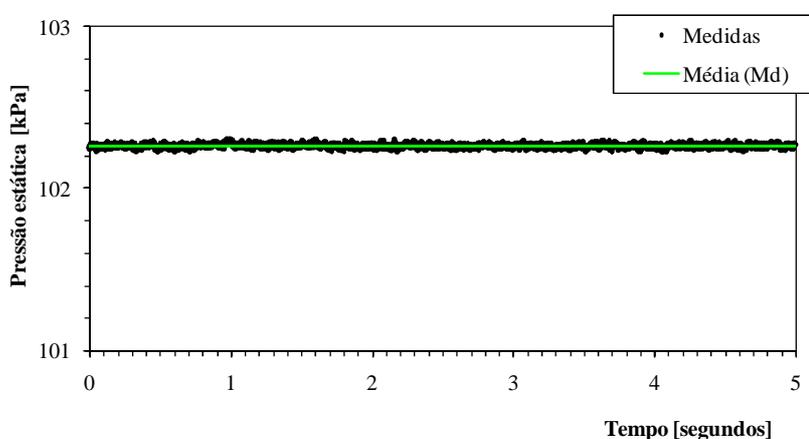


Figura 3.16 – Medidas de pressão em função do tempo via transdutor.

Com a implantação desta instrumentação, um oitavo transdutor pertencente à mesma série e com intervalo entre 0-1 psi foi colocado para medida da perda de carga no medidor Venturi, através do qual a vazão de ar de transporte é calculada. Na Figura 3.17 tem-se a representação do comportamento dessas medidas, compatível com o encontrado para todas as configurações verificadas.

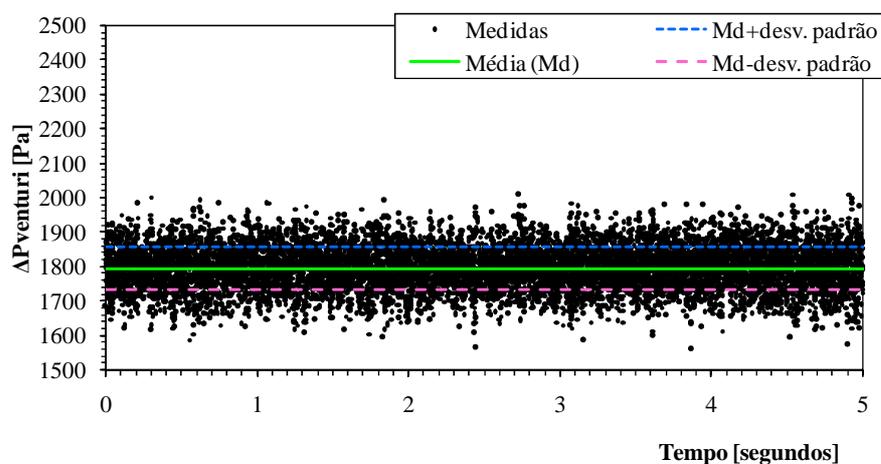


Figura 3.17 – Pontos de perda de carga no medidor Venturi em função do tempo obtidos em uma medida pelo transdutor.

Como foram feitas medidas realizadas só com manômetros e com manômetros e transdutores, experimentos foram realizados a fim de se comparar essas duas configurações de medidas. Essa comparação tem como objetivo a verificação dos primeiros experimentos para as configurações tubo inclinado e válvula-L, sem e com bocais restritivos feitas só com manômetros. A repetição foi realizada para os dados de pressão com o tubo inclinado combinado com os três bocais. Os valores dos gradientes e o perfil de pressão são muito próximos para qualquer uma das configurações, e o comportamento qualitativo das curvas é o mesmo.

Uma vez constatado que as duas configurações de medidas conduzem a resultados similares, decidiu-se que os resultados para o tubo inclinado utilizados na análise serão os obtidos pela combinação transdutores-manômetros, sendo dessa mesma forma as medidas para os alimentadores leito de jorro e horizontal. Já os resultados para a válvula-L serão aquelas medidas obtidas todas através dos manômetros tubo em “U”.

3.4 – Procedimentos experimentais

Para a obtenção dos dados experimentais, primeiramente, foi necessário preencher o reservatório de sólidos com as partículas a serem transportadas no leito (≈ 50 kg). O soprador foi então ligado e a vazão de ar foi ajustada para seu valor máximo. Foi preciso também ajustar a abertura do alimentador de sólidos, sendo inicialmente o valor máximo considerado.

Para garantir que as medidas não fossem realizadas no período transiente térmico do leito, foi necessário aguardar um tempo de estabilização de 2 horas. Essa estabilidade foi verificada no sistema através da temperatura do ar de transporte a ser alimentado no leito. Para tal medida, há instalado na tubulação que sai do soprador, um termômetro com intervalo de 0 a 110°C.

A determinação do tempo necessário para a estabilização foi realizada através de testes preliminares, com medidas de temperatura em intervalos curtos de tempo. Os resultados podem ser visualizados na Figura 3.18. A análise desses mostra que o tempo de 1,5 horas foi suficiente para atingir a estabilidade térmica.

No entanto, por questões de garantia, optou-se por estender este tempo por mais 30 minutos. Os resultados para todas as configurações foram similares.

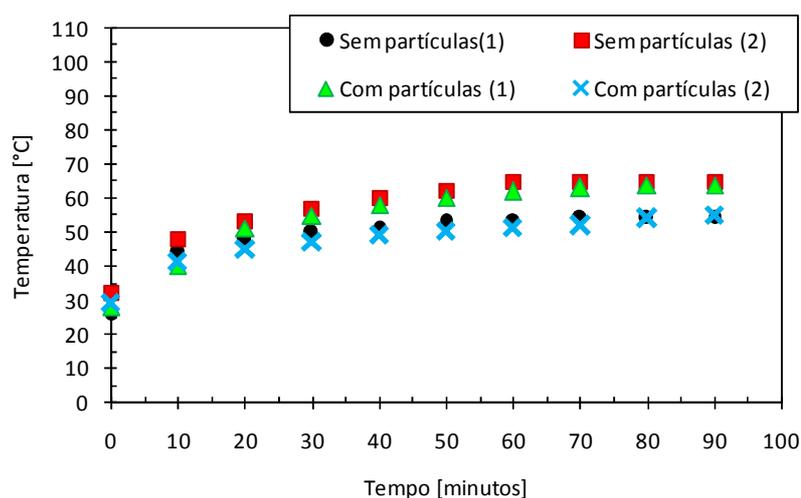


Figura 3.18 – Temperatura na tubulação de fornecimento de ar ao longo do tempo. Configuração: L90° + sem restrição, operando sem e com partículas.

Depois desse intervalo, a vazão de ar foi avaliada pelo medidor Venturi juntamente com a temperatura nesse instante, as pressões ao longo do sistema foram medidas e a vazão de sólidos verificada. Para garantir uma maior precisão dos resultados a medida da vazão de sólidos foi realizada duas vezes, e a média desses valores considerada. Ao final deste procedimento, a vazão de ar de transporte foi então reajustada e o processo reiniciado. Entretanto, o intervalo para estabilização do sistema agora era inferior, em torno de meia hora. Esse procedimento é apresentado na forma de um fluxograma na Figura 3.19.

As medidas foram realizadas começando com as variáveis ajustadas na condição máxima e a réplica no sentido contrário. Seguindo este critério, observando os resultados das configurações investigadas, é possível afirmar que o

sistema não apresenta histerese. As medidas foram realizadas em duplicata, confirmando que já que o sistema apresentou elevada estabilidade, obtendo-se uma excelente reprodutibilidade, com erros próximos de 1% para as medidas de pressão e de 5% para as vazões de sólidos.

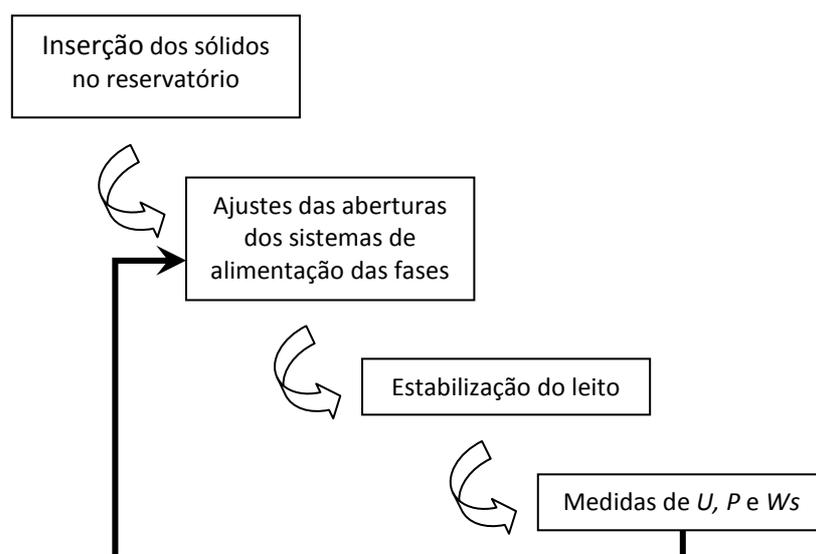


Figura 3.19 – Fluxograma de execução para obtenção dos dados experimentais.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados aqui foram obtidos em um único sistema de transporte pneumático vertical, em formato de “loop”, no qual o sistema de alimentação de sólidos e o trecho de descarga das partículas na linha de transporte podem ser permutados. Assim, foram avaliadas as 11 configurações de alimentação, em diferentes condições operacionais. Os resultados e discussões seguem a ordem apresentada na Figura 4.1, tendo como objetivo o estudo de configurações de sistemas de alimentação formadas a partir de combinações de alimentadores, considerando a influência destas na fluidodinâmica do leito como um todo.

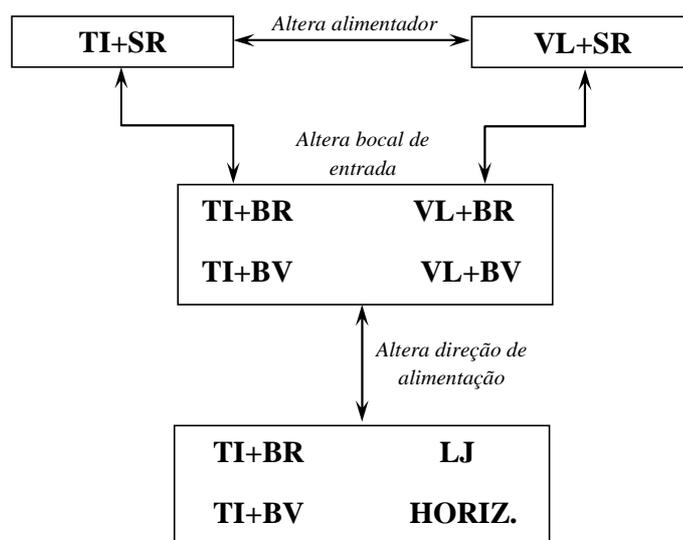


Figura 4.1 – Fluxograma de análise dos pontos experimentais obtidos.

Abreviações reunidas no Quadro 4.1.

O alimentador tubo inclinado combinado com bocal sem restrição foia primeira configuração analisada aqui, e foi a partir dela que as alterações foram propostas para avaliar os efeitos dessas mudanças. Assim, essa configuração foi denominada configuração padrão.

No Quadro 4.1 estão sintetizadas as abreviações aplicadas, juntamente com as aberturas do alimentador estipuladas. Para cada uma dessas condições, a vazão de ar de transporte variou num intervalo de 0 a 47 m/s.

Quadro 4.1 – Nomenclatura e abreviações aplicadas neste trabalho.

Configuração	Abreviatura	Ajuste de W_s
Tubo inclinado combinado com bocal sem restrição	TI+SR	Área seção transversal: [0; 2,9; 22,4] (cm^2)
Tubo inclinado combinado com bocal redutor	TI+BR	Área seção transversal: [0; 2,9; 22,4] (cm^2)
Tubo inclinado combinado com bocal Venturi	TI+BV	Área seção transversal: [0; 2,9; 22,4] (cm^2)
Válvula-L combinada com bocal sem restrição	VL+SR	Aeração auxiliar: [0; 7; 10] (m^3/h)
Válvula-L combinada com bocal redutor	VL+BR	Aeração auxiliar: [0; 7; 10] (m^3/h)
Válvula-L combinada com bocal Venturi	VL+BV	Aeração auxiliar: [0; 7; 10] (m^3/h)
Leito de jorro com bocal redutor	LJ	Distância z_o : [0; 45] (mm)
Horizontal com bocal Venturi	HORIZ.	Área seção transversal: [0; 1,4; 1,8] (cm^2)

4.1 – Fluidodinâmica do “loop” pneumático com alimentador tubo inclinado

Para a configuração padrão, os valores de vazões de sólidos transportados variaram de 15 a 70 kg/h em função das condições de operação, como apresentado na Figura 4.2.

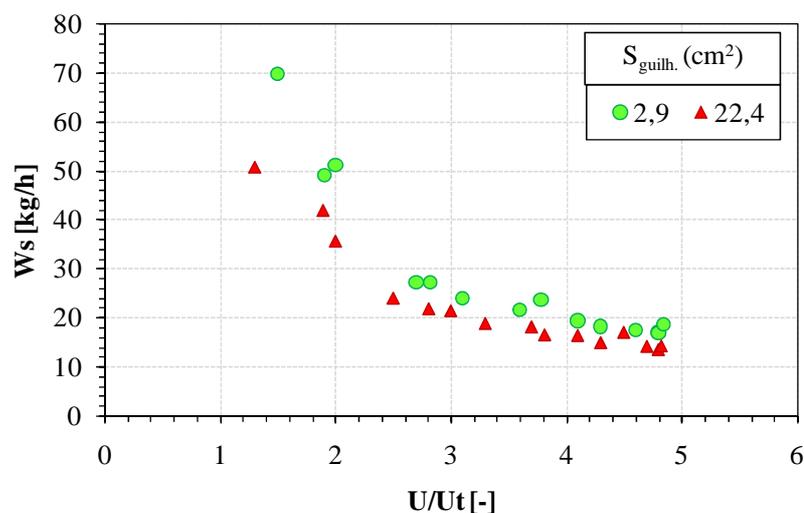


Figura 4.2 – Vazão de sólidos transportada em função da velocidade adimensional do ar, para diferentes aberturas do alimentador.

A análise dessa figura mostra que a vazão de sólidos não é uma variável independente da vazão de ar, e sim umavariável de resposta de U/U_t . Essa relação é decrescente e possui um trecho inicial ($1,3 \leq U/U_t \leq 3,3$) caracterizado por grandes alterações em W_s diante de pequenas mudanças em U/U_t . Somente a partir de valores de $U/U_t > 3,0$ os valores de W_s passam a ter uma variação pequena, com o aumento de U/U_t .

A variação decrescente de Ws em relação a U/U_t deve-se ao desvio de parte do ar de transporte através do alimentador externo e a passagem desse ar cria uma resistência à inserção dos sólidos no sistema. Na Figura 4.3 notam-se os valores dessa vazão desviada pelo tubo inclinado em função da vazão de alimentação do ar.

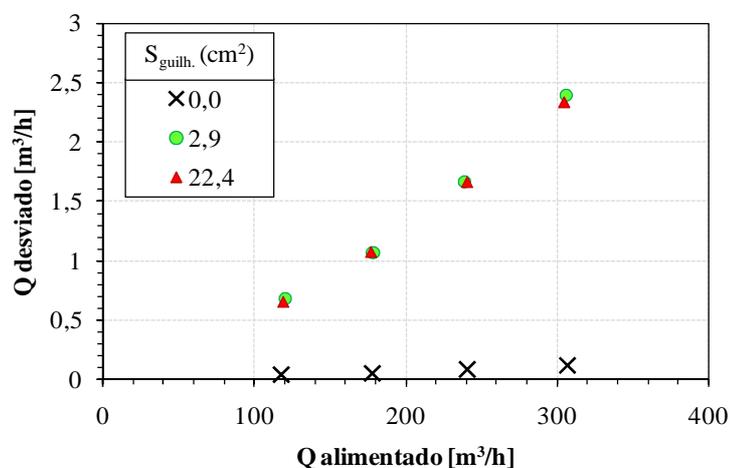


Figura 4.3 – Vazão volumétrica de ar desviada pelo alimentador tubo inclinado, em m^3/h , em função do ar de transporte para o bocal SR e diferentes aberturas do alimentador de sólidos.

Esses resultados mostram uma relação direta entre o aumento da vazão de gás alimentado e a quantidade de gás que é desviada para o alimentador. É interessante avaliar que a vazão de ar desviada, comparada à vazão de ar alimentada, é muito pequena, mas que são determinantes para as condições operacionais do leito. Tal afirmativa é facilmente comprovada quando se confrontam os resultados das Figuras 4.2 e 4.3. Para uma condição onde $U/U_t = 2,0$ (ou $Q_f \approx 124 \text{ m}^3/\text{h}$), a vazão de sólidos transportada é de 40 kg/h , sendo que

nessa condição mede-se uma perda de ar em torno de 0,56% ($\approx 0,7 \text{ m}^3/\text{h}$). Se U/U_t dobrar, ou seja, $Q_f \approx 248 \text{ m}^3/\text{h}$, o desvio de ar medido aumenta para 0,69% ($\approx 1,65 \text{ m}^3/\text{h}$), mas o valor de W_s é reduzido em cerca de 2,3 vezes ($W_s = 18 \text{ kg/h}$).

Nos resultados apresentados, pode-se notar ainda a pouca influência da abertura da guilhotina do alimentador na força motriz que insere o sólido no sistema, mesmo para situações limites de áreas de $2,9 \text{ cm}^2$ e $22,4 \text{ cm}^2$. *A priori*, esperava-se que uma alteração relevante desse parâmetro afetasse a vazão de sólidos; contudo, o que se pode observar é que a carga de sólidos que consegue superar a resistência no ponto de entrada é quase invariável. Sendo assim, pode-se afirmar que a inserção de sólidos é controlada principalmente pelas condições no ponto de conexão alimentador-leito.

Além da vazão de sólidos transportada, outro parâmetro fluidodinâmico importante é o gradiente de pressão, uma vez que este corresponde ao consumo energético gerado pela movimentação ao longo do leito. Os resultados obtidos para o sistema em questão estão apresentados na Figura 4.4, onde o gradiente foi calculado considerando a perda de carga em todo o sistema, incluindo as singularidades (entrada, curva 180° , etc.).

A perda de carga gerada num escoamento de fluido é provocada principalmente pelas forças de atrito com a parede e quando o escoamento é bifásico, o peso das partículas transportadas também pode ser relevante. Nos resultados encontrados, pode-se observar, para a maioria das condições, uma diferença pequena entre os gradientes de pressão sem e com o transporte de sólidos. Sendo assim, pode-se inferir que a fluidodinâmica do sistema avaliado

tem como parâmetro importante nesse as perdas por atrito fluido-parede, onde o aumento da velocidade do ar faz com que o gradiente de pressão seja cada vez maior, sendo a contribuição da força peso dos sólidos pequena. Esse comportamento fluidodinâmico é característico em operações de sistemas de transporte pneumático diluído, segundo os critérios propostos por Leung (1980), já apresentados no Capítulo 2. Somente no trecho inicial, que corresponde a região com os maiores valores de vazões de sólidos, há percepção da influência do peso dos sólidos no gradiente de pressão, indicando que a operação do leito se iniciou com uma condição “mais densa”. Contudo, afirmar que neste este trecho o regime de escoamento é denso não é indicado, já que outras características marcantes desse tipo de escoamento não foram observadas.

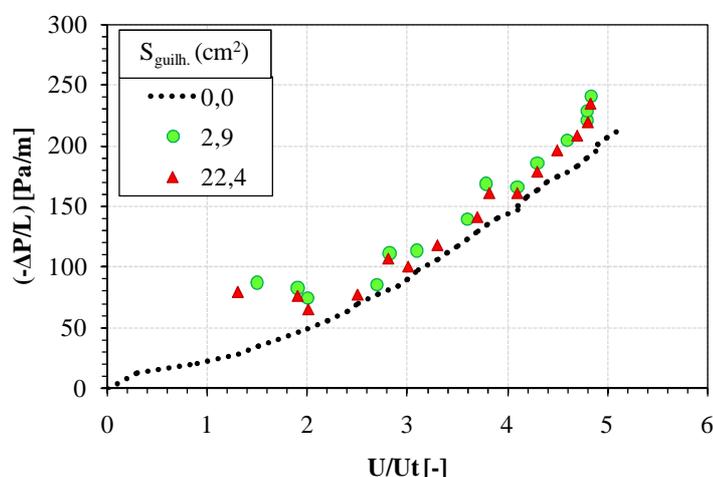


Figura 4.4 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional, para diferentes aberturas do alimentador de sólidos.

Na condução desse estudo fluidodinâmico, o detalhamento da variação da pressão ao longo do sistema foi realizado para quatro condições de velocidades

adimensionais do ar de transporte e aberturas de guilhotina de 0, 2,9 e 22,4cm². Os resultados estão expostos na Figura 4.5. Para todos os casos, constata-se que o aumento da velocidade adimensional do ar no leito aumenta o valor da pressão inicial do sistema e a inclinação do perfil, mantendo praticamente inalteradas as regiões de oscilação da pressão, com ampliação discreta destas perturbações.

Na Figura 4.6, a comparação dos perfis para diferentes aberturas de guilhotina e condição de entrada de ar de transporte fixada em $U/U_t \approx 2,8$ ($U \approx 22$ m/s ou $Q_f \approx 178$ m³/h), está apresentada. Uma análise dessa figura indica, primeiramente, que a configuração do “loop” pneumático produz perturbações na pressão, concentradas principalmente nas singularidades (entrada ($0,03 \leq \zeta \leq 0,26$) e curva de 180° ($3,79 \leq \zeta \leq 5,04$)) e suas adjacências, comportamento coerente com a literatura (Kavassaki, 1985; Lopes, 2007). A importância da identificação desses trechos do sistema está no fato de que nessas regiões os fenômenos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa são intensificados, pois as fases presentes no escoamento possuem perfis de velocidades bem distintos.

Na região de entrada ($0,03 \leq \zeta \leq 0,26$ m) os distúrbios são produzidos a partir da “desordem” gerada no escoamento devido à presença da abertura lateral por onde há entrada de sólidos, sendo o perfil estabilizado somente a partir de uma distância de 1,6 metros. Além disso, nota-se que, mesmo com a inserção de partículas, as perturbações são pouco modificadas, alteradas apenas para um maior patamar de pressão.

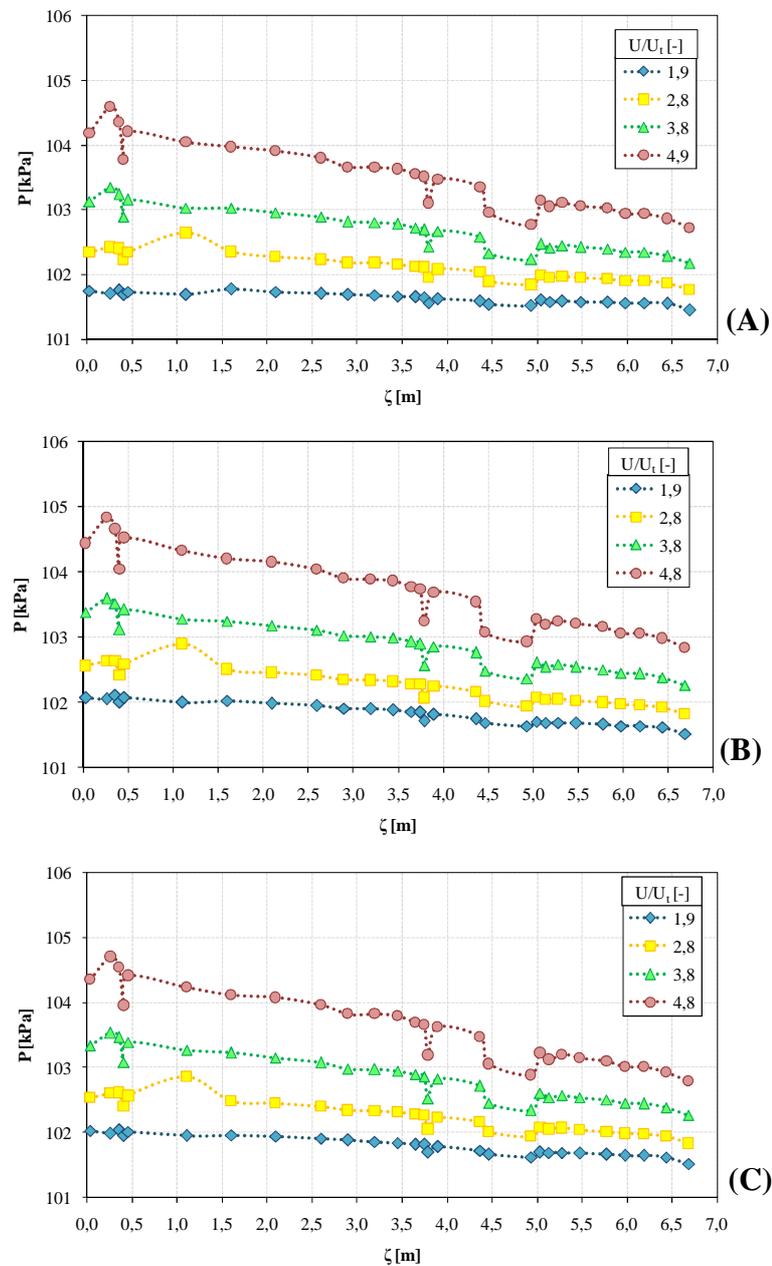


Figura 4.5 – Pressão estática em função do comprimento adimensional do leito, para diferentes velocidades de ar. Área da guilhotina: (A) $0,0 \text{ cm}^2$; (B) $2,9 \text{ cm}^2$; (C) $22,4 \text{ cm}^2$.

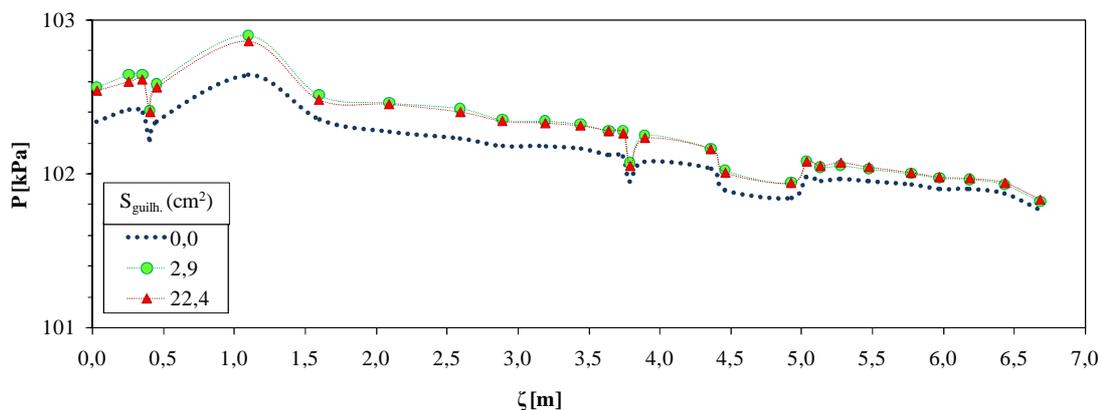


Figura 4.6 – Pressão estática em função do comprimento adimensional do leito, para diferentes aberturas do alimentador de sólidos e velocidade do ar de 22 m/s.

Já na curva de 180° ($3,79 \leq \zeta \leq 5,04$ m), além de alterações na região de mudança de direção propriamente dita, a pressão tem oscilações à jusante e à montante. Contudo, estas variações não são muito extensas, ficando restritas a uma distância média de 40 cm, em ambas as direções. Essas oscilações da pressão são geradas pelas mudanças na estrutura do escoamento à medida que a velocidade varia com a direção, devido à ação da força centrífuga.

Com o objetivo de identificar a relevância da abertura lateral na tubulação na entrada de sólidos no comportamento da pressão, foram obtidos os dados dos perfis de pressão para o escoamento apenas de ar quando o sistema está montado com alimentador externo (Figura 4.7-A) e quando o trecho de entrada é substituído por um tubo sem abertura (Figura 4.7-B). Tais perfis estão apresentados na Figura 4.8 onde a velocidade do ar é de 22 m/s. As pressões foram adimensionalizadas pela pressão máxima medida no leito.

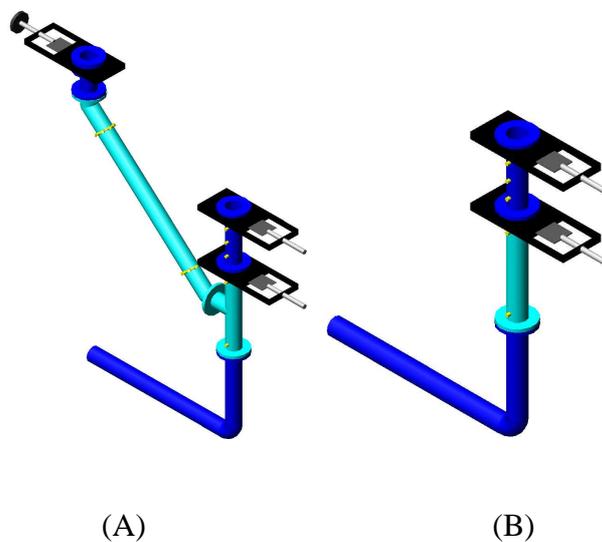


Figura 4.7 – Representação gráfica para a região de entrada do leito com as configurações (A)COM alimentador externo e (B)SEM alimentador externo.

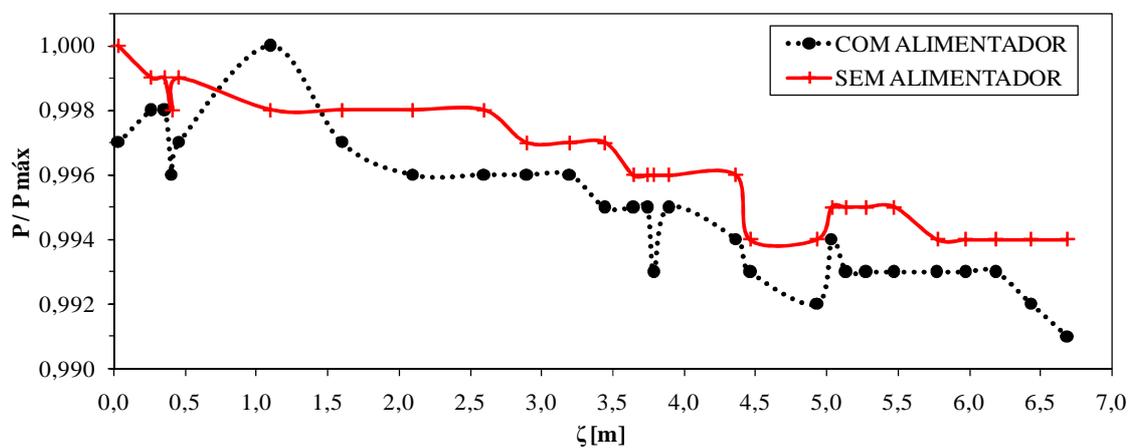


Figura 4.8 – Pressão adimensional ao longo do leito para o escoamento de ar, para configurações do leito COM e SEM alimentador externo e velocidade de 22 m/s.

A comparação mostra comportamentos bem distintos para cada caso, sendo o perfil com alimentador mais instável e perturbado, além de

ocorrer deslocamento do ponto máximo de pressão, que deixa de ser o primeiro ponto do leito e passa para a montante do ponto de conexão do alimentador. Nota-se ainda que partes das oscilações produzidas na curva de 180° e saída do leito são provocadas pela presença do alimentador, e não pelas singularidades em si. Em contrapartida, pode-se verificar que os distúrbios no trecho inicial não se devem única e exclusivamente ao alimentador, sendo estas, em alguma porcentagem, geradas pela mudança de direção horizontal-vertical na tubulação de ar que alimenta o “loop” pneumático (veja Figura 4.7). Caso contrário, o perfil de pressão para a configuração sem alimentador no trecho inicial deveria ter um decaimento constante, e não oscilar entre $0,26 \leq \zeta \leq 0,46$ m.

Para completar a análise fluidodinâmica, as condições de entrada do sistema (abertura da guilhotina e velocidade do ar) e as variáveis respostas do experimento (pressão e vazão de sólidos), foram combinadas numa única figura, que apresenta no eixo das abscissas, a “eficiência” do sistema no transporte de sólidos, denominada β (vazão mássica de sólidos transportada/ vazão mássica de ar alimentada ao sistema). No eixo das ordenadas, tem-se o consumo energético produzido pela fase particulada, representado pela razão entre o gradiente de pressão produzido no transporte ar-sólido e o do gradiente de pressão para o escoamento somente de ar $((-\Delta P/L)/(-\Delta P/L)_o)$. Os resultados estão mostrados na Figura 4.9.

Pela figura, pode-se observar que a configuração avaliada tem (para a maioria das condições operacionais estudadas) uma relação entre a vazão de ar que é alimentada ao sistema e a vazão de sólidos transportada com valores

pequenos. Nas melhores situações, tal equivalência está entre 50% e 60%, e nesses casos, o gradiente de pressão devido ao transporte de sólidos é aumentado em quase três vezes. Ressalta-se que maiores valores de β estão associados a valores baixos de U (Figura 4.10). Esse comportamento é favorável, pois uma vazão de ar menor no sistema de transporte pneumático está associada a um consumo de energia menor, já que o atrito entre o fluido e a parede é proporcional ao quadrado da velocidade do ar. Entretanto, o trecho de operação mais favorável, por exemplo, $\beta \geq 0,4$, para a configuração apresentada aqui é muito estreito, com valores de U/U_t entre 1,2 e 1,6 ($9,4 \leq U[\text{m/s}] \leq 12,5$).

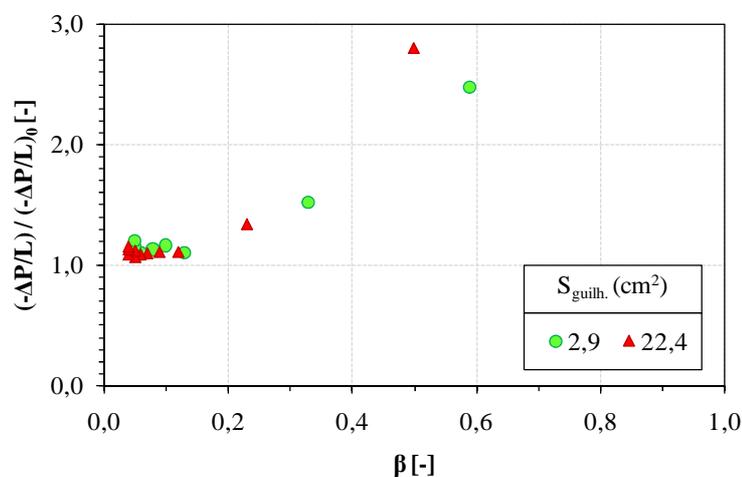


Figura 4.9 – Razão entre os gradientes de pressão bifásicos e monofásicos em função de β , para diferentes condições de operação e aberturas de guilhotina.

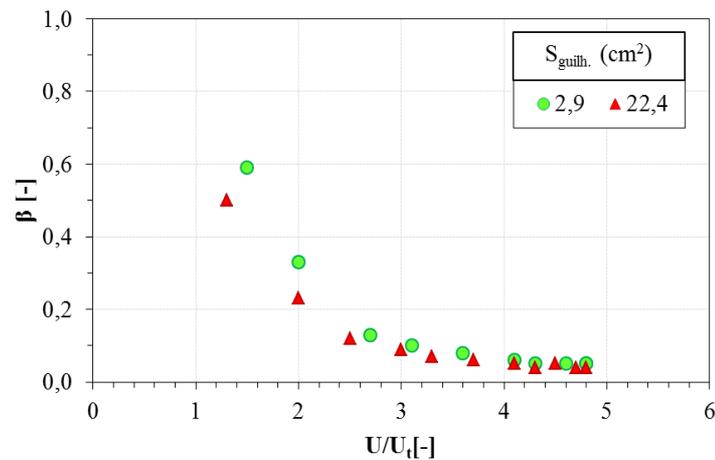


Figura 4.10 – Razão β em função de U/U_t .

Por fim, os valores de β apresentados na Figura 4.10 ajudam a reforçar a afirmativa de que o sistema opera em regime diluído, quando se compara com os resultados obtidos por Maet *al.* (2010), que examinaram um leito pneumático com transporte em regime denso, onde utilizaram velocidades de ar entre 5-12 m/s e produziram um intervalo de β entre 20-70.

4.2 – Tipo de alimentador de sólidos

Da análise anterior, observa-se que, apesar da manipulação da variável abertura do alimentador, o intervalo de operações não é alterado, tornando tal configuração de sistema fixada em determinadas condições. Entretanto, muitas vezes num transportador pneumático qualquer, pode existir a necessidade de

expansão dos limites operacionais, como por exemplo, na ocorrência de um aumento de produção ou alteração do material manuseado. Naturalmente, a engenharia apresenta um vasto leque de alternativas de adaptações existentes para o alcance desse fim, com diferentes níveis de complexidade e custos. Uma dessas alternativas é a mudança do sistema de alimentação de cada uma das fases. A literatura apresenta várias alternativas de sistemas de alimentação de sólidos, tanto de princípio mecânico como não mecânico. Como já mencionado anteriormente, hoje os esforços se concentram na utilização de alimentadores não mecânicos, devido às vantagens inerentes a estes. Nesse estudo, apenas esses tipos de alimentadores serão considerados.

Na alimentação da fase particulada em um sistema de transporte pneumático, o alimentador tipo tubo inclinado (TI) apresenta-se como a maneira mais simples e direta de se conectar a saída do reservatório de sólidos e o ponto de inserção de partículas no leito, por se tratar basicamente de um trecho de tubulação (Veja Figura 2.7). No entanto, dentre os alimentadores não mecânicos, um dos mais utilizados e estudados na literatura é a válvula-L (VL). Assim, a análise apresentada a seguir trata da comparação entre a fluidodinâmica do “*loop*” pneumático avaliado diante da aplicação dos alimentadores tubo inclinado e válvula-L.

Na Figura 4.11 estão apresentados os valores de vazões de sólidos obtidos para os dois tipos de alimentadores no transporte de esferas de vidro de 1mm. Vale lembrar que o ajuste da quantidade de sólidos alimentado em cada alimentador é

diferente. Para o tubo inclinado a variável é a área de abertura da válvula guilhotina (S); na “L” essa variável é a vazão de aeração (Q_{aer}).

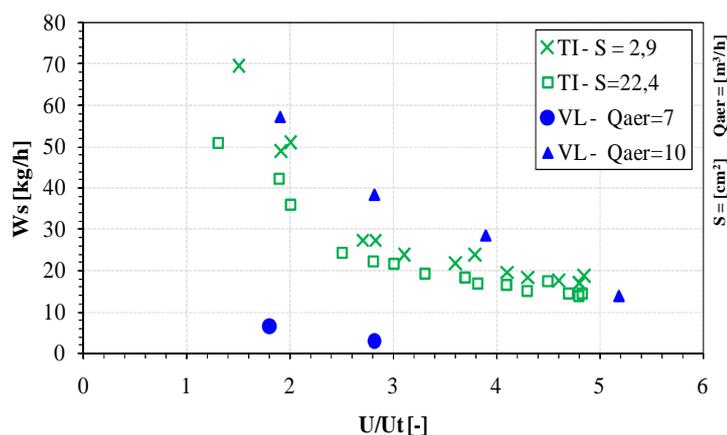


Figura 4.11 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para os alimentadores externo tubo inclinado e válvula-L, com diferentes valores para a variável de ajuste de vazão de sólidos.

A análise dos resultados permite afirmar que a troca do alimentador externo tubo inclinado pela válvula-L não apresentou alterações significativas nas vazões de sólidos máximas transportadas pelo sistema, sendo o maior valor encontrado para a válvula-L de 60 kg/h. Contudo, este alimentador permite ao sistema uma operação na região com valores de $W_s < 14$ kg/h, num intervalo de U/U_t entre 1,8 a 2,8 m/s. Para o tubo inclinado, qualquer que seja a abertura do alimentador ou a vazão de ar, esse intervalo operacional de vazão de sólidos não foi alcançado.

Na operação com a válvula-L, para ambas Q_{aer} , a vazão de sólidos tem decaimento constante à medida que U/U_t aumenta em todo o trecho operacional, que está entre $1,8 \leq U \text{ [m/s]} \leq 5,2$. Esse comportamento decrescente é similar ao do leito operando com o tubo inclinado. Entretanto, as razões do comportamento decrescente de W_s em relação a U/U_t são distintas para cada configuração de alimentação.

Numa válvula-L aberta para atmosfera, para que os sólidos sejam inseridos no leito, a impulsão gerada pela vazão de aeração auxiliar deve ser superior à somatória das forças peso das partículas e atritos. Já quando a válvula está inserida num sistema fechado, os sólidos em movimento precisam vencer, além dessas forças, a resistência que o ar de transporte provoca no ponto de descarga da válvula-L, sendo que esta resistência aumenta com o aumento da velocidade do ar. Nesse estudo, é esta dinâmica que controla a inserção de sólidos no sistema, quando o alimentador é a válvula-L, e por isso quando o valor de U/U_t aumenta, para um Q_{aer} fixo, a resistência imposta pela pressão no sistema faz com que a quantidade de sólidos seja reduzida. E quando a impulsão vinda no sentido do alimentador é maior (ou seja, maior a vazão de aeração), a quantidade de partículas que adentram o sistema também aumenta.

A operação do leito, seja com a válvula-L ou o tubo inclinado, apresenta um gradiente de pressão que aumenta à medida que U/U_t cresce, como apresentado na Figura 4.12, o que, de acordo com análises já realizadas, conferem ao sistema um comportamento característico de escoamento diluído, onde as perdas por atrito de fluido com a parede são predominantes. Observa-se ainda que,

para qualquer condição de operação, o sistema com válvula-L possui gradientes de pressão mais elevados. Essa forte influência da válvula-L na queda de pressão do leito pode ser justificada a partir dos resultados de Rhodes e Laussmann (1992), que mostram que a perda de carga gerada na válvula-L influencia todo o balanço de pressão no sistema. Além disso, vale destacar que a vazão de ar real que escoar no leito é um pouco superior ao da operação com tubo inclinado, pois ela é a soma da vazão de ar de transporte mais a vazão de aeração, subtraída as perdas na alimentação. Esses aumentos são inferiores a 10% do valor da vazão de ar de transporte alimentada ao sistema.

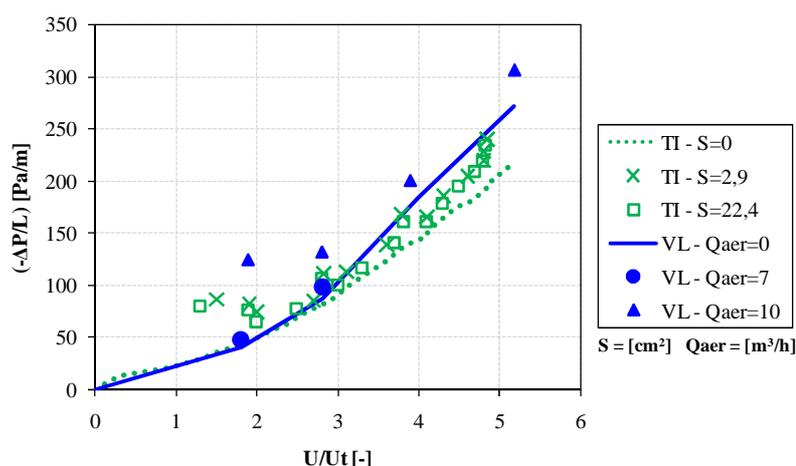


Figura 4.12- Gradiente de pressão total em função da velocidade adimensional do ar para os alimentadores tubo inclinado (TI) e válvula-L(VL), com diferentes aberturas do alimentador.

O detalhamento do perfil de pressão ao longo do sistema, para as condições avaliadas estão apresentados na Figura 4.13, para os dois alimentadores com velocidade do ar de transporte igual a 22 m/s.

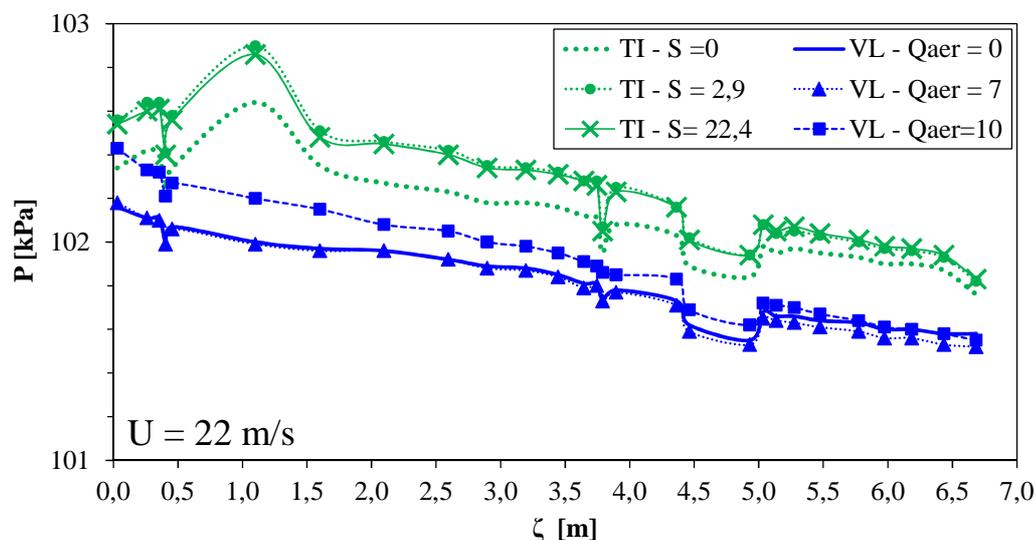


Figura 4.13 – Pressão estática em função do comprimento adimensional do leito, para velocidade do ar de 22 m/s, para as configurações de alimentação tubo inclinado (TI) e válvula-L (VL), com escoamento de ar; variável de ajuste de inserção de sólidos com valores mínimos (TI – S = 2,9 cm²; VL - Qaer = 7 m³/h) e máximos (TI – S = 22,4 cm²; VL - Qaer = 10 m³/h).

A característica marcante da comparação dos perfis dos alimentadores é que, em todas as condições operacionais, as pressões com a válvula-L são inferiores às com o tubo inclinado, apesar desta válvula produzir gradientes de pressão um pouco maiores e transportar uma maior quantidade de sólidos. Por exemplo, para o caso da variável de ajuste de sólidos com o maior valor (TI-S=22,4 cm²; VL-Qaer = 10 m³/h), o tubo inclinado tem valores de W_s e $(-\Delta P) / L$ de 22 kg/h e 106,61 Pa/m, respectivamente, enquanto para a válvula-L esses valores são de 38,2 kg/h e 132,13 Pa/m. Além disso, a configuração com a válvula-L tem região de aceleração 5 vezes menor. As perturbações na curva

ocorrem nas mesmas posições em ambas as configurações, mas com a “L” elas são de menor amplitude.

Na Figura 4.14 a comparação entre o consumo energético para o transporte de esferas de vidro de 1 mm $((-\Delta P/L)/(-\Delta P/L)_0)$ em função da eficiência mássica de transporte (β), das configurações de alimentação com tubo inclinado e com a válvula-L é apresentada. A análise desses valores apresenta um resultado muito similar ao discutido no tópico anterior, com poucas condições experimentais onde $\beta \geq 0,4$. No entanto, novamente aqui a condição de baixa velocidade do ar de transporte na melhor condição operacional se repete, o que garante, por exemplo, uma operação do sistema pneumático com indicadores de desgaste mais moderados.

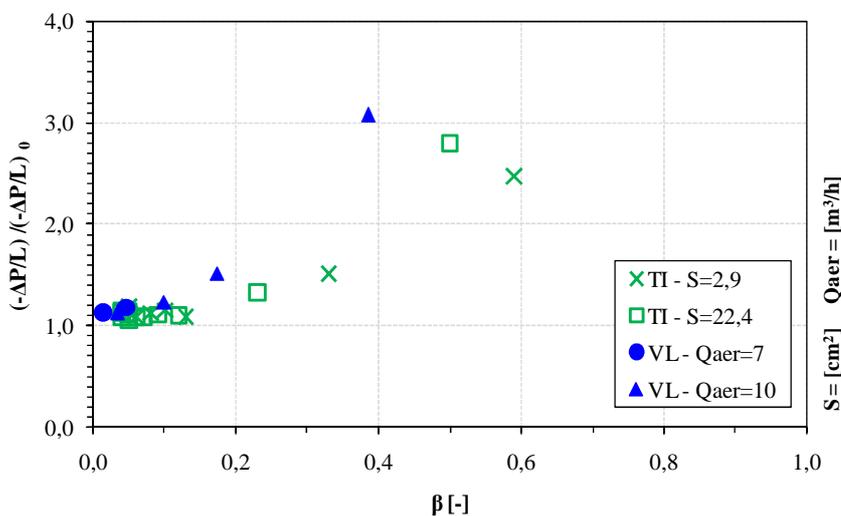


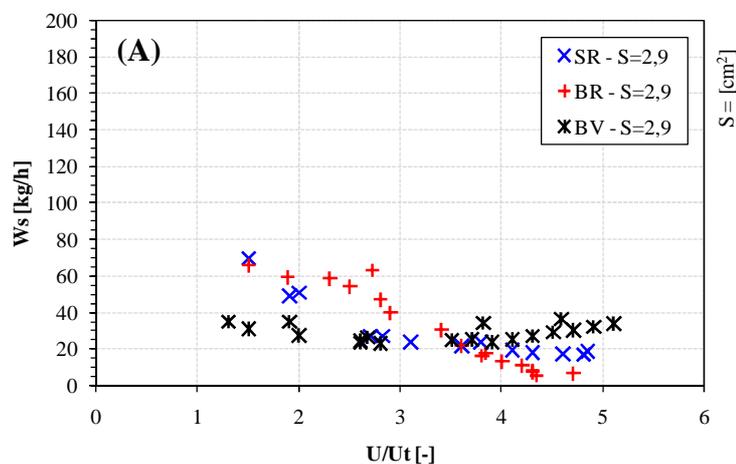
Figura 4.14 – Razão entre os gradientes de pressão bifásicos e monofásicos em função de β , para diversas condições de operação.

4.3 – Utilização de bocais restritivos

Nesse estudo, a alternativa proposta para a melhoria de parâmetros de operação num transportador pneumático é o emprego de bocais restritivos, seguindo a linha de alguns trabalhos da literatura, como o de Olazaret *al.* (1992), que avaliaram a aplicação desta técnica em leitos de jorro. As principais vantagens da utilização desses dispositivos são a reutilização do sistema de alimentação já estabelecido para o sistema e o custo de implementação.

Aqui, as reduções brusca e gradual são avaliadas, representadas, respectivamente, pelo bocal redutor (BR) e bocal Venturi (BV). Ambos os dispositivos tem grau de redução de 38,2% e foram combinados com os alimentadores tubo inclinado (TI) e válvula-L(VL).

Nas Figuras 4.15 e 4.16 estão apresentados os valores de vazões de sólidos obtidos, para os alimentadores analisados, divididos em gráficos separados para cada abertura do alimentador.



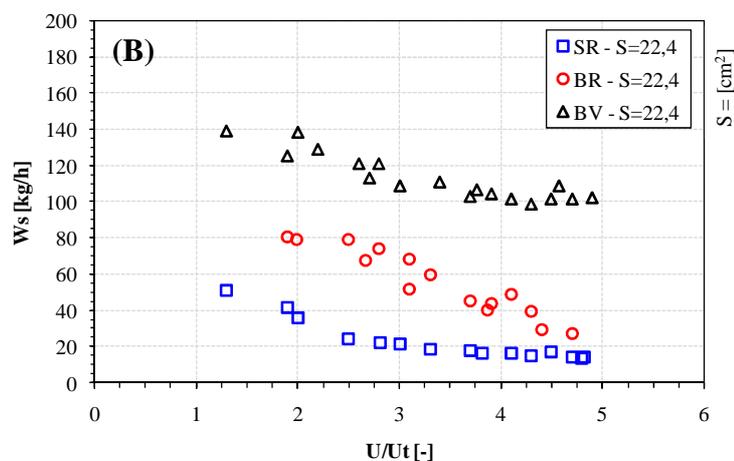


Figura 4.15 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para a operação com alimentador tubo inclinado e bocais para as aberturas de: (A) 2,9 cm²; (B) 22,4 cm².

Para o tubo inclinado, observa-se que a colocação dos bocais quando a abertura do alimentador é de 2,9 cm² provoca alterações do comportamento de W_s em função de U/U_t . Comparado à situação sem qualquer restrição, quando se tem o bocal redutor, essa relação passa a ser mais acentuada. Para o SR, uma mudança de U/U_t de 1,9 para 4,8, provoca uma redução de W_s de 62% (49,1 kg/h → 18,8 kg/h); já para o BR essa redução faz com que o valor de W_s caia de 59,5 kg/h para 6,5 kg/h (redução de 90%). As vazões de sólidos para o BR são maiores que para o SR e BV, no intervalo de velocidade adimensional entre 1,9 e 3,5. No caso do uso do BV, a curva passa a ter um ponto de inflexão, e a partir de $U/U_t = 3,5$, um aumento na velocidade do ar provoca um aumento na vazão de sólidos, e os valores passam a ser maiores aos dos demais casos.

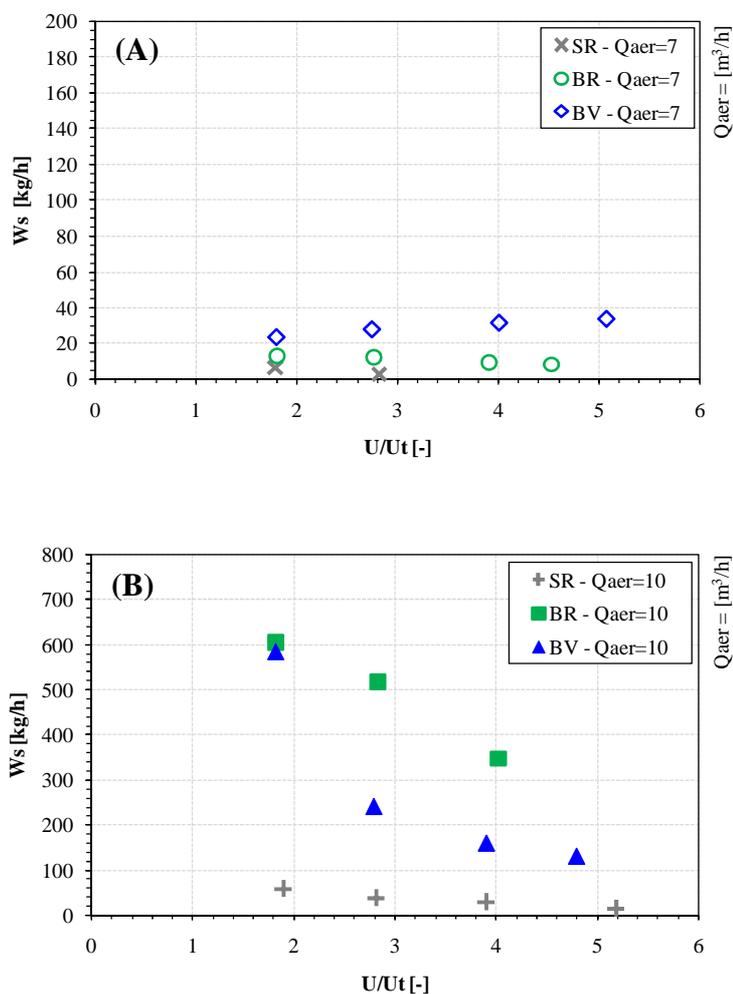


Figura 4.16 – Vazão de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para a operação com alimentador válvula-L e bocais para as aberturas de:

(A) 57%;(B) 83%.

Já se a abertura do alimentador TI é total, a influência dos bocais é visivelmente observada nos valores de vazões de sólidos medidos, sendo as maiores vazões obtidas para o bocal Venturi. Por exemplo, numa velocidade adimensional igual a 2, as vazões de sólidos são de 35,8 kg/h, 79,3 kg/h e 138,7kg/h, para o SR, BR e BV, respectivamente.

Esse aumento da vazão de sólidos quando há utilização dos bocais deve-se ao fato destes provocarem um direcionamento do ar de transporte para o centro da tubulação, minimizando os desvios de ar como mostrado na Figura 4.17. Essa redução é superior para o bocal redutor; todavia, os maiores valores de vazões de sólidos são encontrados para o Venturi. Isso ocorre porque, juntamente com a redução do desvio, esses dispositivos têm ainda a inserção da fase sólida numa região de pressão negativa, ou seja, uma região de sucção que facilita o arraste das partículas para dentro do leito. O comportamento observado na Figura 4.15-A mostra que, nessas condições operacionais, esses efeitos de sucção do Venturi variam ao longo de todo o intervalo operacional para uma abertura de 2,9 cm², enquanto que na Figura 4.15-B essa influência está bem caracterizada.

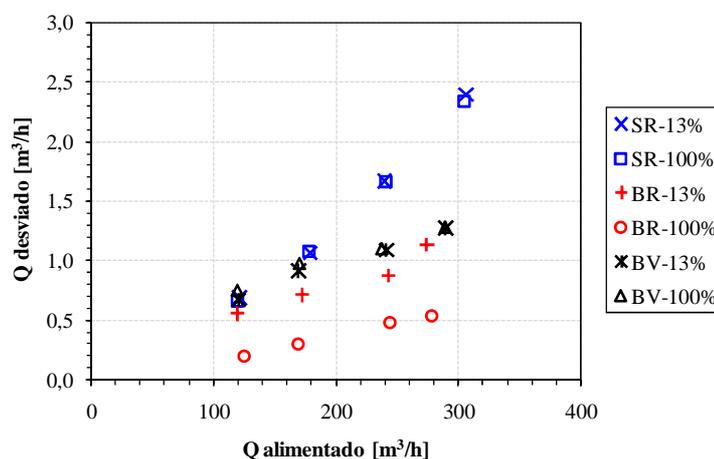


Figura 4.17 – Vazão volumétrica de ar desviada pelo alimentador tubo inclinado, em m^3/h , em função do ar de transporte para os bocais SR, BR e BV e diferentes aberturas do alimentador de sólidos.

Na operação com a válvula-L (Figura 4.16), se $Q_{aer} = 7 \text{ m}^3/\text{h}$, o comportamento de W_s observado varia de acordo com o bocal, sendo que quando o bocal é o redutor, a vazão de sólidos é decrescente e quando é o Venturi, a relação de W_s com U/U_t é crescente. Ainda é notado que os maiores valores são obtidos para o BV, sendo a presença da região de sucção um dos principais fatores para tal resposta. Já para a aeração máxima ($Q_{aer} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$), na utilização do BR são verificados os maiores valores de W_s , devido à redução da resistência na entrada do alimentador, que, por causa das características do dispositivo em si, é mais proeminente para o bocal redutor. E aqui, como a impulsão que alimenta os sólidos já é maior, o fato de haver uma menor resistência na entrada das partículas torna-se mais relevante do que a sucção provocada pelo Venturi.

Acompanhando os aumentos dos valores de vazões de sólidos, ressalta-se também um aumento para os gradientes de pressão, como observado na Figura 4.18, quando há presença de bocais restritivos, tanto para o alimentador tubo inclinado quanto para a válvula-L. Esse comportamento advém de um aumento da perda de carga causada pela presença dos bocais no sistema, como destacado na Figura 4.19 para os alimentadores TI e VL, acrescido do aumento da contribuição da força peso dos sólidos, já que os valores de W_s são maiores. A comparação entre os dados das Figuras 4.18 A e B apontam para um gradiente de pressão gerado para as configurações com a válvula-L um pouco maiores que para o tubo inclinado, sendo a maior diferença presente com a utilização do bocal redutor. Desse resultado conclui-se que o tipo de alimentador é muito relevante para as respostas fluidodinâmicas do sistema.

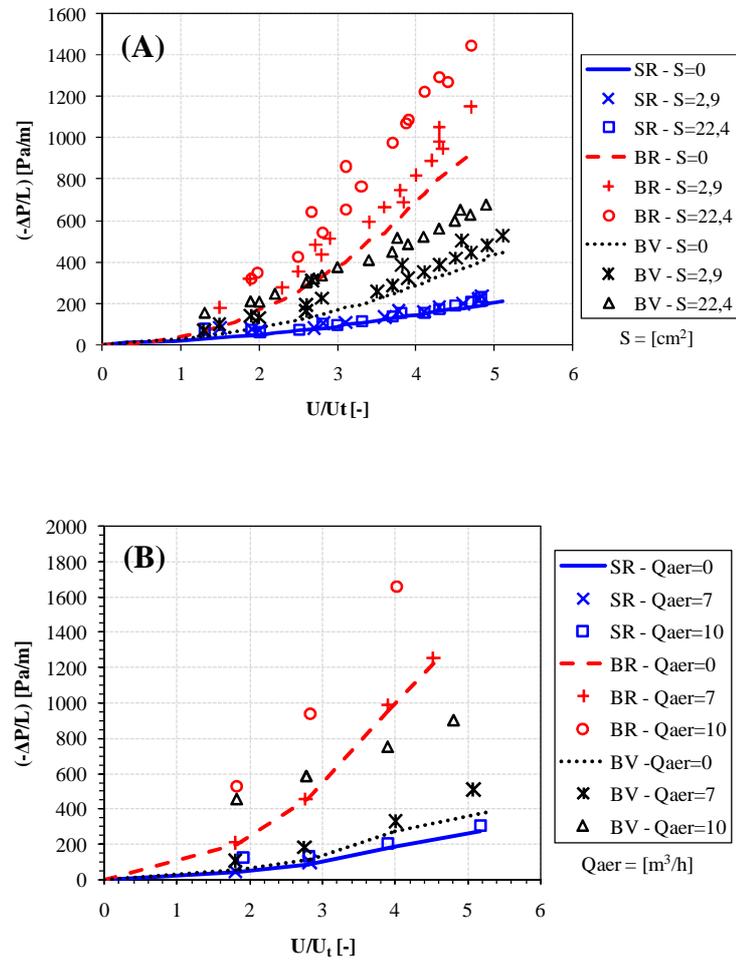
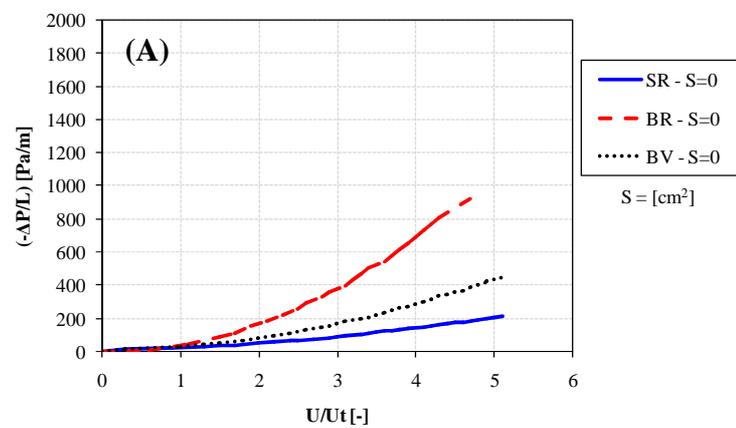


Figura 4.18 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para diferentes configurações do sistema de alimentação (com e sem bocais) e aberturas do alimentador para (A) tubo inclinado e (B) válvula-L.



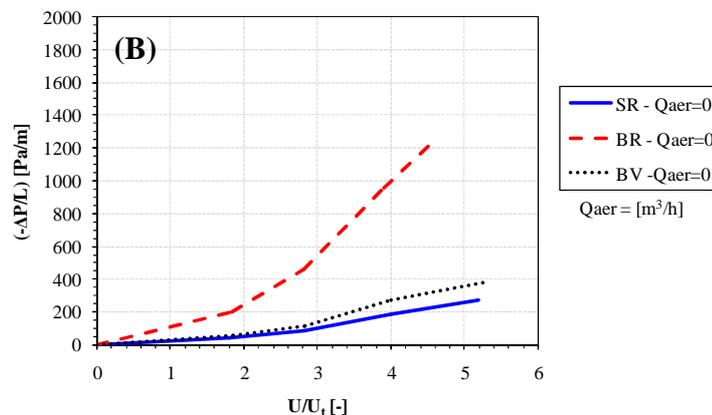


Figura 4.19 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para o escoamento de ar e diferentes configurações do sistema de alimentação (com e sem bocais) com o (A) tubo inclinado e (B) válvula-L.

Na análise da Figura 4.19 observa-se que a presença do bocal redutor produz um aumento superior do gradiente de pressão comparado ao bocal Venturi. Essa superioridade deve-se à forma de como a redução da área de passagem do ar ocorre. No bocal redutor, a corrente de ar encontra abruptamente uma região de escoamento reduzida. Já no Venturi, essa redução é gradual, além de conter uma região posterior à garganta desenhada para recuperar parte da pressão perdida durante a constrição.

Nessa figura, observa-se ainda a influência dos bocais restritivos nos limites do intervalo de operação. Como o bocal redutor provoca as maiores perdas de carga, este acaba por produzir um intervalo menor, sendo o valor máximo de U/U_t igual a $\approx 4,6$, enquanto que para os casos sem restrição e Venturi, esses limites são de $\approx 5,2$.

O impacto da utilização dos bocais restritivos no perfil de pressão do “loop” pneumático pode ser verificado em detalhes na Figuras 4.20 e 4.21, que mostram os perfis de pressão estática adimensional (razão entre a pressão estática com escoamento bifásico sobre a pressão para o escoamento apenas de ar, na mesma condição operacional) ao longo do leito. Os dados foram obtidos para uma velocidade de ar de 22 m/s e abertura de guilhotina e aeração máximas (TI- $S=22,4 \text{ cm}^2$; VL- $Q_{\text{aer}}=10 \text{ m}^3/\text{h}$).

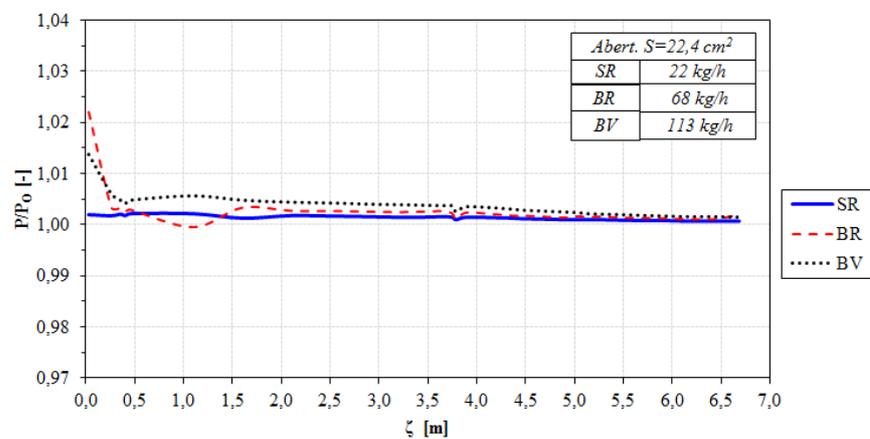


Figura 4.20 – Pressão ao longo do leito para o tubo inclinado e diferentes bocais de entrada. $U = 22 \text{ m/s}$ ($U/U_t = 2,8$); abertura $S = 22,4 \text{ cm}^2$.

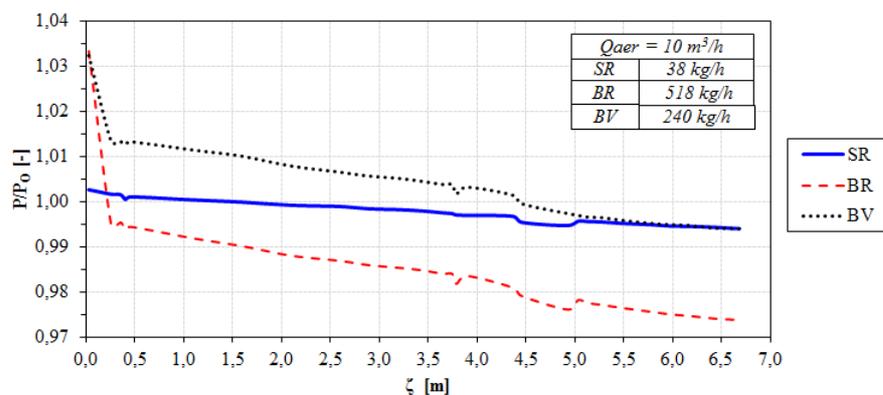


Figura 4.21 – Pressão ao longo do leito para a válvula-L e diferentes bocais de entrada. $U = 22 \text{ m/s}$ ($U/U_t = 2,8$); $Q_{\text{aer}} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para o alimentador tubo inclinado (Figura 4.20) é notável que a discrepância entre os perfis com diferentes bocais está restrita ao ponto de pressão inicial e região de entrada até $\zeta \approx 2,0$ m. No restante do leito, inclusive na curva de 180°, o perfil é semelhante, inclusive em termos de valores de pressão, mesmo para vazões de sólidos diferentes. Já para a válvula-L (Figura 4.21), a variação da pressão é distinta para cada uma das configurações de entrada, nos valores de pressão alcançados dentro do leito e na inclinação das curvas. Nas configurações com bocais, o ponto com maior pressão está localizado anterior aos bocais restritivos. Esse resultado deve-se ao fato de que esses bocais são um obstáculo à passagem do ar, elevando a pressão à jusante da barreira.

Na Figura 4.22 estão apresentados os valores do gradiente de pressão adimensional $((-\Delta P/L)/(-\Delta P/L)_o)$ em função da razão mássica das fases ($\beta = W_s/W_f$) para as configurações e condições operacionais avaliadas. A análise global desses dados aponta para uma variedade de respostas de operação a partir de alterações realizadas no sistema de alimentação de sólidos. Para as variáveis de ajuste de W_s com o ajuste mínimo (TI – S = 2,9 cm²; VL – Q_{ar} = 7 m³/h), os maiores valores alcançados para a razão mássica β é de 0,6, sendo que para a grande maioria das condições operacionais este valor não é maior que 0,4. Já para operação nas condições máximas dos alimentadores (TI – S = 22,4 cm²; VL – Q_{ar} = 10 m³/h), quer este seja o tubo inclinado ou a válvula-L, um maior intervalo de condições é obtido, com β alcançando valores que vão de 0,03 até 1,36. Na maioria desses casos o aumento do gradiente de pressão advindo do transporte de sólidos é de 1,13 a 3,07 do que o alcançado para o escoamento de ar. Para a maior

eficiência mássica obtida, esse valor é de 3,74, e corresponde à alimentação com tubo inclinado combinado com o bocal Venturi.

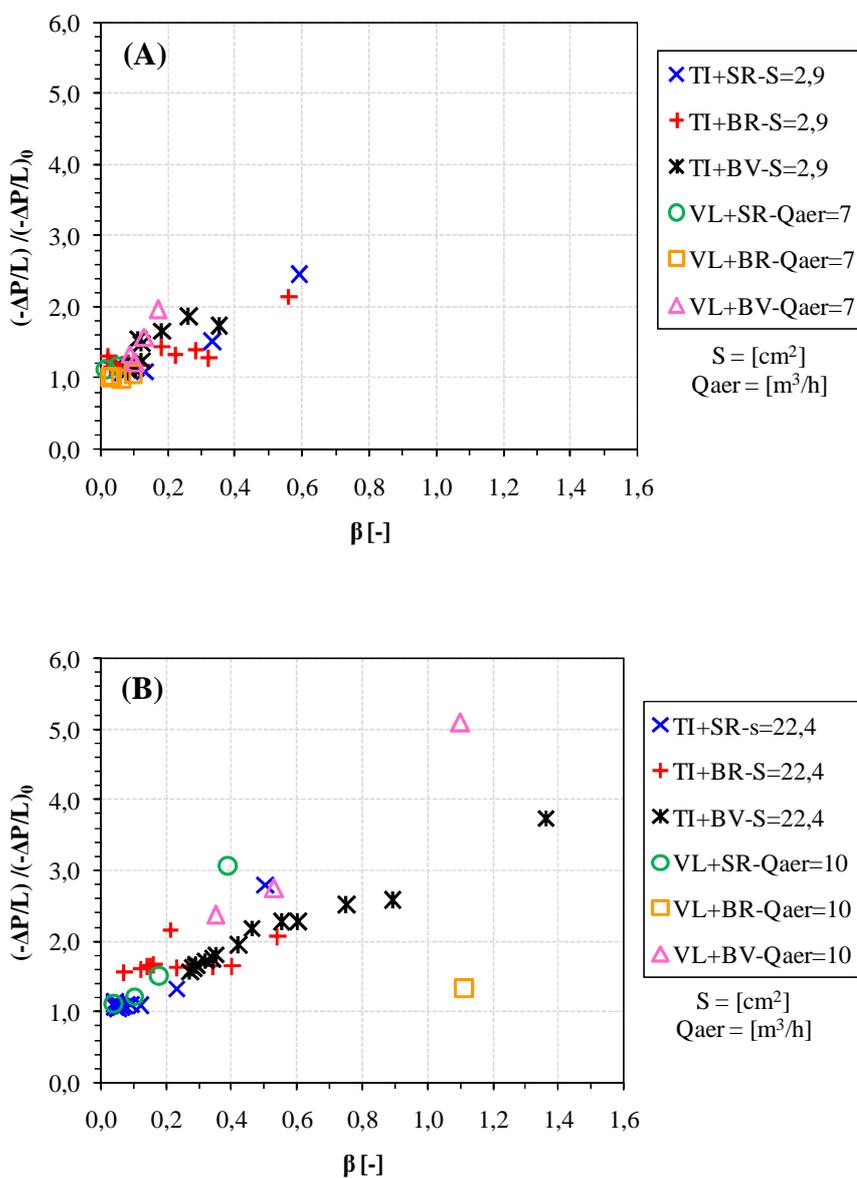


Figura 4.22 – Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para diversas condições de operação e configuração de alimentação para as aberturas do alimentador (A) mínimas e (B) máximas.

4.4 – Formas de inserção dos sólidos

Diante dos bons resultados encontrados a partir da combinação de alimentadores não mecânicos com bocais de entrada restritivos, a comparação desses resultados com configurações de alimentação que possuem bocais de entrada semelhantes é proposta, a fim de verificar a influência da forma de inserção da fase sólida, que ainda não foi alterada. As comparações serão realizadas com as configurações tubo inclinado combinado com bocal redutor e com o Venturi, sempre para uma condição de ajuste da vazão de sólidos máxima nos alimentadores.

Para todas as configurações avaliadas até aqui, a alimentação de sólidos ocorre sempre no trecho vertical do leito e com entrada lateral (Figura 4.23-A). Os alimentadores desenvolvidos que permitem a modificação da forma de inserção das partículas no leito e ainda possuem restrição na entrada são os alimentadores tipo jorro e horizontal, apresentados detalhadamente no Capítulo 3.

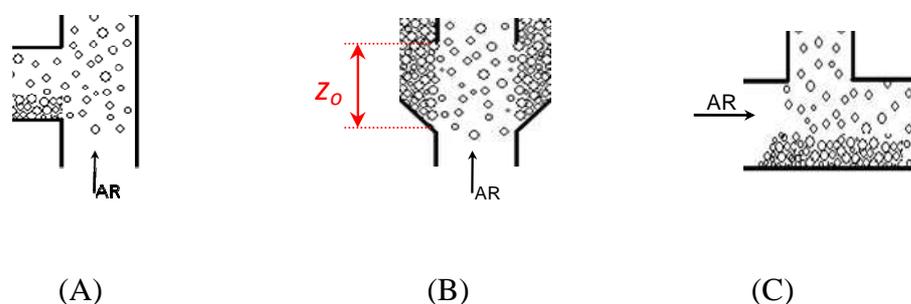


Figura 4.23- Forma de entrada dos sólidos para cada tipo de alimentador.

(A) Tubo inclinado ou válvula-L; (B) Leito de jorro; (C) Horizontal.

O alimentador leito de jorro é a combinação de um leito deste tipo e um bocal redutor aplicado na entrada do ar. O ajuste da vazão de sólidos alimentada desse sistema de alimentação é realizado através da manipulação das variáveis z_o e vazão de ar de transporte. Nesse caso, apenas a vazão de ar foi alterada, ficando a distância z_o fixada em 45 mm. A entrada dos sólidos no sistema é realizada ao longo de todo o perímetro da tubulação ascendente (Figura 4.23-B). Vale ressaltar aqui que, quando as medidas para a configuração com leito de jorro foram realizadas para o escoamento somente de ar, significa que o sistema estava isento de material particulado.

O alimentador horizontal, por sua vez, é constituído por um tubo que conecta a base do reservatório ao ponto de entrada de sólidos do bocal Venturi, e este se encontra instalado no trecho horizontal da tubulação que, nos demais casos, direciona o escoamento apenas de ar de transporte até a base vertical do leito. O ajuste da vazão de sólidos alimentada neste alimentador dá-se a partir da manipulação da válvula guilhotina localizada entre a base do reservatório e o tubo de descida, sendo o ponto de entrada dos sólidos lateral no sentido horizontal (Figura 4.23-C).

Os resultados das vazões de sólidos para cada uma das configurações supracitadas estão apresentados na Figura 4.24, onde se observam intervalos operacionais distintos para cada alimentador. Destes, o leito de jorro é o que proporciona os maiores valores de W_s , sendo o menor valor nesse caso de 440 kg/h. Porém, o intervalo operacional de U/U_t é estreito, com $1,8 \leq U/U_t \leq 3,2$, ao passo que nos demais casos o intervalo vai de 1,2 até 5,0. Nesse estreito intervalo

de U/U_t , o leito de jorro apresenta dois comportamentos antagônicos: entre 1,8 e 2,1, W_s reduz com o aumento de U/U_t ; no restante do intervalo o aumento da velocidade do ar produz um transporte de sólidos maior no sistema. Nesse segundo trecho os resultados são coerentes aos do estudo de Ferreira (1996), que apresenta comportamento similar para o alimentador adicionado de um bocal redutor. A alimentação horizontal apresenta um comportamento em todo o intervalo de U/U_t mais estável, no entanto, as vazões de sólidos obtidas não ultrapassaram um valor máximo de 18 kg/h.

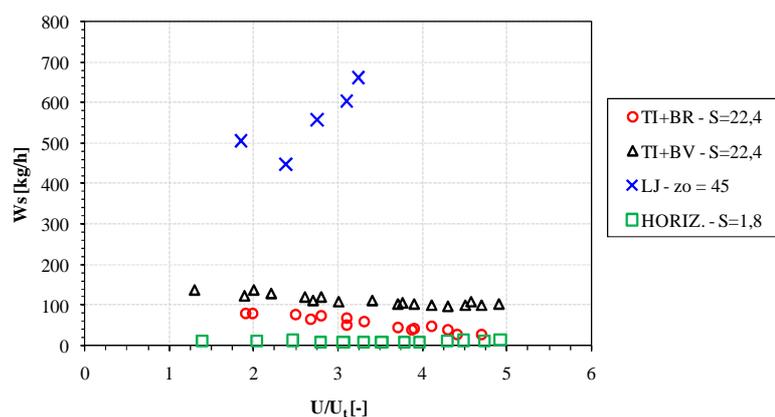


Figura 4.24 – Vazões de sólidos em função da velocidade adimensional do ar para diferentes configurações de alimentação de sólidos e condições de operação.

Um dos fatores que contribuem para que o leito de jorro alimente uma vazão de sólidos mais alta em relação aos demais alimentadores é a área livre para passagem nos sólidos. Nos alimentadores tubo inclinado e horizontal, essa área é a da seção transversal do tubo, de 22,4 cm². Já no leito de jorro, essa entrada é de 75,5 cm², que corresponde ao perímetro do tubo vezes a altura de 45 mm (área

237% maior). Ainda assim, a configuração da região de alimentação é o ponto de maior relevância para este alto desempenho, fato confirmado quando se leva em conta os valores de densidade de fluxo de sólidos (Gs), apresentados na Tabela 4.1 para uma velocidade adimensional igual a 3. Se apenas a área livre de passagem importasse, as configurações TI+BR, TI+BV e HORIZ. obteriam respostas similares, já que nessas situações a área é a mesma.

Tabela 4.1 – Densidade mássica de sólidos para diversas configurações de entrada, para $U/U_t = 3$.

Configuração	Vazão de sólidos [kg/h]	Área de passagem dos sólidos [cm²]	Densidade mássica de sólidos [kg/m²s]
TI+BR	68,4	22,4	8,5
TI+BV	121,4	22,4	15,1
LJ	606,1	75,5	22,3
HORIZ.	11,7	22,4	1,5

Vale destacar aqui que, quando a alimentação horizontal foi utilizada, se a abertura da guilhotina fosse superior a 1,8 cm², o transporte de sólidos passava a ser instável, na forma de pulsos. As medidas não foram obtidas por causa da capacidade dos medidores do leito, que eram superadas devido às oscilações. Esse comportamento mostra que esse tipo de alimentação é inadequado para sistemas onde o escoamento diluído é necessário; entretanto, tal configuração manifesta-se bastante promissora para leitos operados em regime denso.

Completando as respostas fluidodinâmicas do sistema para cada configuração, na Figura 4.25 estão os valores de gradiente de pressão em função

de U/U_t . Nessa figura, observa-se que o comportamento das curvas para o escoamento de ar nos alimentadores que possuem bocal Venturi é similar, mesmo que o sistema horizontal tenha um comprimento de tubulação com 65 cm a mais. Já as curvas para o transporte de sólidos são diferentes devido à contribuição da força peso das partículas na perda de carga de cada caso, pois o tubo inclinado tem uma vazão de sólidos em média 8,5 vezes maior que o alimentador horizontal. Esses resultados mostram que a presença de bocal um bocal tipo Venturi tem uma influência que prevalece na fluidodinâmica do leito, tornando a diferença entre as configurações do restante do sistema pouco significativa.

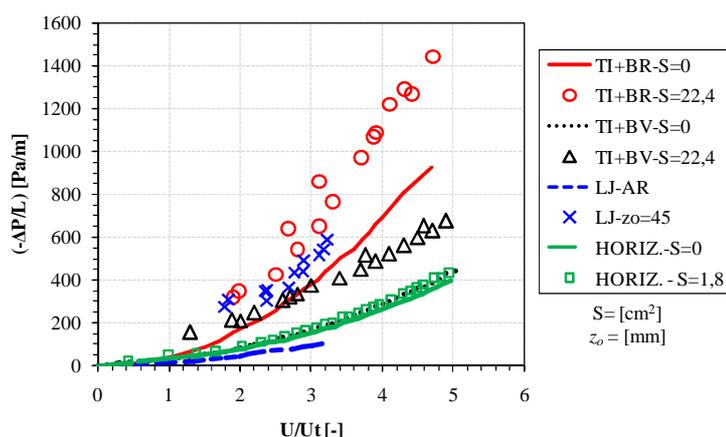


Figura 4.25 – Gradiente de pressão em função da velocidade adimensional para diferentes configurações de entrada na condição de escoamento de ar com abertura superior do alimentador, para este estudo.

Para que uma comparação similar fosse realizada entre as configurações com bocal redutor, seria necessário calcular a perda de carga das configurações num mesmo trecho do leito, desconsiderando a entrada, pois as medidas nessa

região para o leito de jorro não foram efetuadas. Como alternativa, a comparação será realizada com base nos perfis de pressão para o escoamento apenas de ar nas configurações tubo inclinado com bocal redutor e leito de jorro. Estes perfis estão presentes na Figura 4.27, para uma velocidade de ar de transporte igual a 22 m/s.

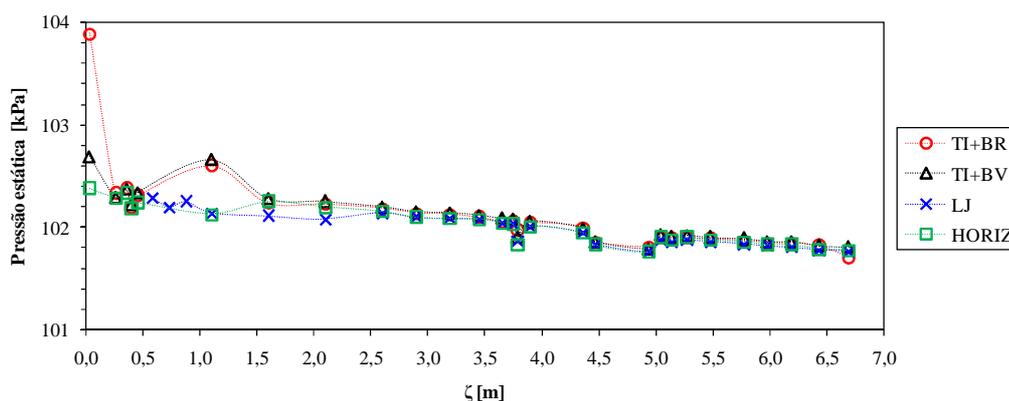


Figura 4.26–Pressão estática ao longo do leito para diferentes configurações de entrada, com velocidade do ar de transporte de 22 m/s.

As comparações dos perfis obtidos para as alimentações TI+BR e LJ, e também entre os alimentadores TI+BV e HORIZ. mostram que o comprimento de entrada e a alimentação de sólidos são relacionados. Nesse caso, a configuração com a maior zona de aceleração é a configuração com o alimentador tipo jorro ($La = 2,02$ m); nas demais situações $La = 1,57$. Entretanto, se esse parâmetro e as vazões de sólidos são confrontados, o leito de jorro ainda apresenta-se bastante favorável, já que tem sua zona de aceleração 29% maior, mas uma vazão de sólidos pelo menos 3,6 vezes maior que os demais casos.

A influência da configuração da alimentação dos sólidos é restrita à região de entrada, já que a partir de $\zeta = 2,6$ m, os perfis são quase idênticos. Contudo, a configuração da alimentação de sólidos influencia as condições operacionais do sistema, como constatado nos dados de $(-\Delta P/L)/(-\Delta P/L)_0$ em função de W_s/W_f , apresentados na Figura 4.27, para os alimentadores de sólidos avaliados com a condição de ajuste de W_s com seus maiores valores. Essa figura confirma a superioridade da configuração com o leito de jorro no fator maior vazão de sólidos transportada.

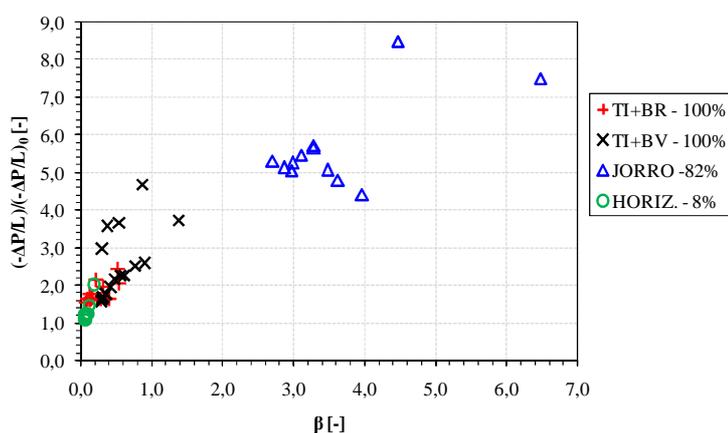


Figura 4.27 – Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para diversas condições de operação e configuração de alimentação para as variáveis de ajuste da vazão de sólidos alimentada na condição máxima.

4.5 – Análise global das configurações de alimentação

Das análises realizadas nesse estudo, pode-se verificar que os tipos de alimentadores de sólidos aplicados no sistema de transporte pneumático em

“loop”, têm influenciada a fluidodinâmica do sistema limitada à região de entrada, caracterizando o perfil de pressão nesse trecho e o comprimento de entrada (L_a) necessário à estabilização das velocidades das fases ao longo do *riser*. Além disso, a forma de alimentação das partículas é ainda determinante para as condições operacionais do sistema, como o intervalo de velocidades do ar de transporte e vazões de sólidos alcançadas.

A combinação de alimentadores não-mecânicos com bocais de entrada restritivos apresenta-se como uma técnica efetiva para redução do ar desviado pelo alimentador de sólidos, o que acarreta um aumento nas vazões de sólidos transportadas no sistema. No entanto esses dispositivos aumentam a perda de carga gerada no sistema, pois provocam uma elevação nas pressões iniciais do leito. Entre os bocais averiguados, o bocal redutor apresenta o maior aumento de queda de pressão, sem obter as maiores elevações de W_s , que são produzidas pelo bocal Venturi. Contudo, vale destacar que, em termos de custos de aquisição, o valor de um bocal Venturi é superior ao de um bocal redutor.

Para o “loop” pneumático utilizado nesse estudo, um “mapa operacional” para o transporte diluído, é apresentado na Figura 4.28, considerando as variáveis do sistema: configuração da alimentação de sólidos, vazão de ar de transporte, vazão de sólidos, abertura do alimentador e gradiente de pressão. Pode-se observar que, de uma maneira geral, este leito apresenta um grande intervalo de possibilidades de operação e configurações para o transporte de esferas de vidro de 1mm. A indicação adequada vai depender da necessidade de cada processo. Por exemplo, se há necessidade de vazões de sólidos mais

elevadas, a escolha da configuração da alimentação de partículas ficará restrita à condição da maior abertura do alimentador.

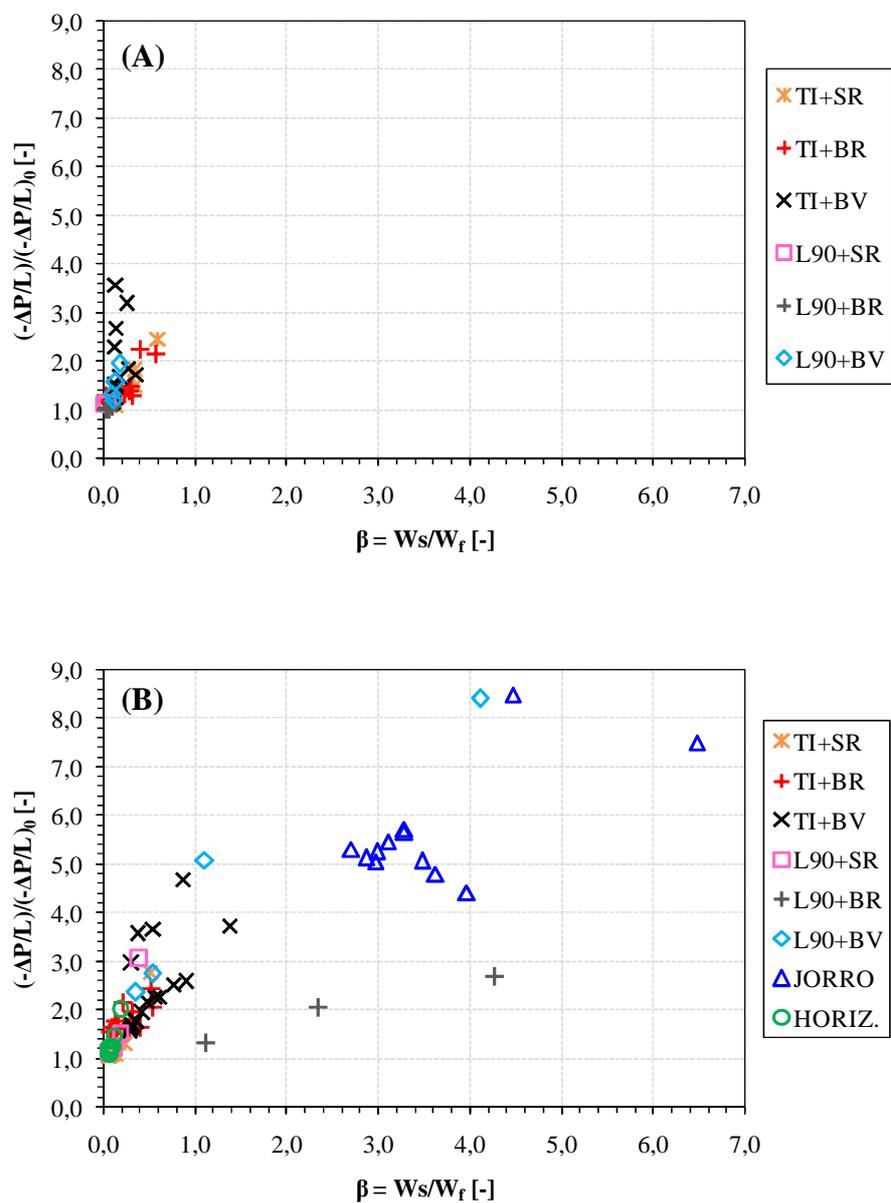


Figura 4.28 - Gradiente de pressão adimensional em função da eficiência mássica do sistema, para todas as condições de operação e configurações de alimentação de sólidos avaliadas nesse estudo, para as variáveis de ajuste de W_s com valores (A) mínimos e (B) máximos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

A partir das análises apresentadas nesse estudo para um sistema de transporte pneumático em “*loop*” e as onze configurações do sistema de alimentação de sólidos consideradas, destacam-se as seguintes conclusões.

- A configuração da alimentação de sólidos é um fator determinante para as condições operacionais possíveis num transportador pneumático, principalmente em relação à vazão de sólidos transportada.
- O leito apresenta um grande intervalo de possibilidades de operação e configurações de alimentação de sólidos para o transporte de esferas de vidro de 1 mm, podendo-se adequar a diferentes processos e necessidades.
- Na operação de leitos onde o alimentador da fase sólida é do tipo tubo inclinado ou válvula-L, a inserção das partículas no sistema é controlada pelas condições no ponto de descarga dos sólidos.

-
- Para a operação com qualquer uma das configurações de alimentação de sólidos considerada, os perfis de pressão possuem oscilações, sendo essas restritas às singularidades da linha, como região de entrada e curva de 180°.
 - A configuração com o maior comprimento de entrada foi com o alimentador leito de jorro ($L_a = 2,02$ m) e o menor comprimento foi obtido com a válvula-L ($L_a = 0,5$ m).
 - Testes para avaliar qualitativamente o impacto da furação lateral, que permite a inserção dos sólidos, no perfil de pressão obtido para o escoamento de ar puro mostraram que as perturbações em todo o leito (entrada, curva de 180° e saída) não são provocadas unicamente pelo escoamento gás-sólido. A forma dessa estrutura física contribui em parte, para o comportamento oscilatório da pressão.
 - A aplicação de bocais restritivos combinados com os alimentadores não mecânicos é uma alternativa viável para aumentar a vazão de sólidos transportada num leito pneumático. Como consequência, a presença desses bocais no sistema provoca um aumento relevante no gradiente de pressão gerado e podem afetar de forma significativa a vazão de sólidos. A influência desses bocais no comprimento de entrada dos sistemas não foi observada.
 - A configuração com alimentação horizontal proposta apresentou-se inadequada para operações em sistemas de transporte pneumático vertical com regime diluído, pois apresenta um intervalo de vazões de sólidos com valores baixos ($W_s < 20$ kg/h).

- O “*loop*” pneumático considerado nesse trabalho apresenta condições de operações mais eficientes (volume de partículas transportado em função do volume de ar alimentado) para o transporte de esferas de vidro de 1mm, com as configurações de alimentação com os alimentadores válvula-L, combinada com bocais de restrição (reductor ou Venturi) e com a alimentação do tipo leito de jorro.

5.2 – Sugestões

Devido ao caráter experimental do trabalho, um volume significativo de pontos experimentais foi obtido, para diversas configurações de alimentação de sólidos. Esses dados são úteis para futuros estudos de simulação de transportadores pneumáticos, a fim de aprofundar a compreensão dos fenômenos envolvidos num nível microscópico, através da aplicação de balanços de massa, energia e quantidade de movimento com alto grau de detalhamento em volumes de controle cada vez menores. As análises numéricas são propostas ainda para a verificação da influência das características físicas dos alimentadores e dos bocais, como a razão entre os diâmetros da alimentação e da tubulação de transporte, mais formas de bocais restritivos e também o limite para a constrição, ampliação da escala do leito, etc. nas respostas fluidodinâmicas de um sistema de transporte pneumático vertical.

Aconselha-se ainda um estudo quantitativo do impacto da estrutura física de um alimentador no escoamento de gás num leito pneumático, incentivado pelos resultados obtidos na análise qualitativa da influência da furação lateral de entrada de sólidos, realizada no Item 4.1, que mostraram que o tipo de desenho da região de alimentação pode gerar perturbações no perfil de pressão do sistema, independente da presença de partículas no escoamento.

Vale ainda verificar de forma criteriosa a aplicação da alimentação do tipo horizontal em sistemas de transporte pneumático vertical em regime denso, já que os resultados desse estudo indicaram tal aplicação promissora para esses casos.

Por fim, a utilização de partículas de tamanhos iguais ou superiores a deste trabalho é aconselhada para futuros estudos de sistemas de transporte pneumático. Atualmente, na grande maioria dos estudos as partículas aplicadas possuem diâmetro médio inferiores a 1 mm. Essas “*coarse particles*” são importantes uma vez que representa sólidos manipulados em operações de secagem, aplicação sempre promissora dos sistemas de transporte pneumático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKILLI, H.; LEVY, E.K.; SAHIN, B. Gas-solid flow behavior in a horizontal pipe after 90° vertical-to-horizontal elbow. **Powder Technology**. v. 116, p. 43-52, 2001.

ÁLVARES, M. M. **Análise da medida de escoamento de sólidos em um transportador pneumático vertical**. 1997. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1997.

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

ARENA, U., LANGELI, C. B., CAMMAROTA, A. L-valve behaviour with different size and density. **Powder Technology**. v.98, p. 231-240, 1998.

AZZI, A., FRIEDEL, L., KIBBOUA, R., SHANNAK, B. Reproductive accuracy of two-phase flow pressure loss correlations for vertical 90° bends. **Forschung im Ingenieurwesen**. v.67, p. 109-116, 2002.

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

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

-
- CARTAXO, S. J. M. **Simulação orientada a objeto do transporte pneumático**. 2000. 254p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.
- CHENG, Y., WEI, F., YANG, G., JIN, Y. Inlet and outlet effects on floe patterns in gas-solid risers. **Powder Technology**. v.98, p. 151-156, 1998.
- COSTA, I. A.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Analysis of regime transitions and flow instabilities in vertical conveying of coarse particles using different solids feeding systems. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v.82, p. 48-59, 2004.
- DE WILDE, J., VAN ENGELANDT, G., HEYNDERICKX, G. Gas-solid mixing in the inlet zone of a dilute circulating fluidized bed. **Powder Technology**. v.151, p. 96-116, 2005.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**, 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003. 346p.
- DZIDO, G.; PALICA, M.; RACZEK, J. Investigations of the acceleration region in the vertical pneumatic conveying. **Powder Technology**. v. 127, p. 99-106, 2002.
- FELTRAN, M. B. **Estudo do desempenho de um alimentador de sólidos tipo válvula-L de pequeno diâmetro**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2005.
- FERREIRA, M. C. **Desenvolvimento de um leito pneumático com alimentador tipo jorro**. 1996. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1996.

FERREIRA, M. C. **Desenvolvimento de um secador leito pneumático com reciclo de sólidos e com alimentador tipo jorro.** 1991. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1991.

FERREIRA, M. C., FREIRE, J. T. Pneumatic conveying of coarse particles in vertical pipes. In: MARTIN, S., WILLIAMS, J. R. (Orgs.) **Multiphase Flow Research.** Hauppauge- NY: Nova Science Publishers, 2009. p.731-767.

GBRAVCIC, Z.B.; GARIC, R.V.; JOVANOVIC, S. D., ROZIC, LJ. S. Hydrodynamic modeling of vertical accelerating gas-solids flow. **Powder Technology.** v.92, p. 155-161, 1997.

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

GELDART, D., JONES, P. The behavior of L-valves with granular powders. **Powder Technology.** v.67, p. 163-174, 1991.

GIDASPOW, D. **Multiphase Flow and Fluidization – Continuum and Kinetic Theory Descriptions.** New York: Academic Press Inc., 1993. 467 p.

GIORGETTI, M. F. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte para Estudantes de Engenharia.** São Carlos: Suprema, 2008. 500p.

GRACE, J. R. Contacting modes and behavior classification of gas-solid and other two-phase suspensions. **Canadian Journal Chemical Engineering.** v.64, p. 353-363, 1986.

HAIDER, A., LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. **Powder Technology.** v.58, p. 63-70, 1989.

HUBER, N., SOMMERFELD, M. Characterization of the cross-sectional particle concentration distribution in pneumatic conveying systems. **Powder Technology**. v.79, p. 191-210, 1994.

JOSEPH, S., KINZING, G. E. Vertical gas-solid transition flow with electrostatics. **Powder Technology**. v.36, p. 79-87, 1983.

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

KAVASSAKI, Y. **Desenvolvimento de técnicas de medidas de baixas pressões diferenciais aplicadas à determinação de perdas de carga localizada em conexões com redução**. 1985. 118p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

KIM, J., TACHINO, R., TSUTSUMI, A. Effects of solids feeder and riser exit configuration on establishing high density circulating fluidized beds. **Powder Technology**. v.187, p. 37-45, 2008.

KNOWLTON, T. M., HIRSAN, I. L-valves characterized for solids flow. **Hydrocarbon Processing**. p. 149-156, 1978.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Butterworth-Heinemann, 2008. 491p.

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

LITTMAN, H., MORGAN III, M.H., PACCIONE, J.D., JOVANOVIC, S.DJ. GRBAVCIC, Z.B. Modeling and measurement of effective drag coefficient in decelerating and non-accelerating turbulent gas-solid dilute phase flow of large

particles in a vertical transport pipe. **Powder Technology**. v. 77, p. 267-283, 1993.

LOPES, C. S. **Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático**. 2007. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2007.

LOPES, C. S., SOUSA, R. C., FERREIRA, M. C., FREIRE, J. T. Transporte Pneumático Vertical de Partículas. In: FERREIRA, M. C., FREIRE, J. T. (Eds) **Aplicações em Sistemas Particulados**. São Carlos: Suprema, 2009. p.142-172.

MA, A. C., WILLIAMS, K. C., ZHGOU, J. M., JONES, M. G. Numerical study on pressure prediction and its main influence factors in pneumatic conveyors. **Chemical Engineering Science**. v.65, p. 6247-6258, 2010.

MARCUS, R.D., LEUNG, L.S., KLINZING, G.E., RIZK, F. **Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach**. Great Britain: St. Edmundsbury Press, 1990. 575 p.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2002. 152p.

MONCEAUX, L., AZZI, M., MOLODTSOF, Y., LARGE, J. F. Overall and local characterization of flow regimes in a circulating fluidized bed. In: Circulating Fluidized Bed Technology, I, 1986, Canadá. **Proceedings of First international Conference on Circulating Fluidized Beds**, Canadá, 1986.

OLAZAR, M., SAN JOSE, m. J., AGUAYO, A. T., ARANDES, J. M., BILBAO, J. Stable operation conditions for gás-solid contact regimes in conical spouted beds. **Ind. Eng. Chem. Res.** v.31, p. 1784-1792, 1992.

OLIVEIRA, J. C. D. **Estudo experimental de uma válvula cônica para controle da descarga de sólidos em leito fluidizado**. 2001. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2001.

OSTI, D. Z. **Comportamento operacional de um sistema de alimentação de sólidos tipo jorro em um tubo de transporte pneumático com diferentes configurações de entrada**. 2003. 50 p. Trabalho de Graduação (Conclusão do curso de graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2003.

PATROCÍNIO, A. B. **Contribuições ao estudo do escoamento gás-sólido na presença de curvas**. 2005. 297p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2005.

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

PETTYJOHN, E. S., CHRISTIANSEN, E. B. Effect of particle shape on free-settling rates of isometric particles. **Chemical Engineering Progress**. v.44, n°2. p. 157-172, 1948.

RHODES, M. J., LAUSSMANN, P. A study of the pressure balance around the loop of a circulating fluidized bed. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v.70, p. 625-630, 1992.

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

ROSA, C. A., FREIRE, J. T. Avaliação da influência de diferentes bocais de entrada nos parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro. In: ENEMP, XXXIII, 2008, Aracaju. **Anais do XXXIII ENEMP**, Aracaju, 2008.

ROSA, C. A., RODRIGUES, A. L., ALMEIDA, A. R. F., BONATO, C., RIECK, R., SOUZA, L. F. M., GARIM, M. M. Um estudo experimental para o transporte pneumático da farinha de arroz. In: Salão de Iniciação Científica, XV, 2003, Porto Alegre. **Anais do XV Salão de Iniciação Científica**, Porto Alegre, 2003.

SANTANA, C. C., PEREIRA, J. A. R., MASSARANI, G. Transporte pneumático vertical em fase densa. In: ENEMP, VIII, 1980, Curitiba. **Anais do VIII ENEMP**, Curitiba, 1980.

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

SCHALLERT, R.; LEVY, E. Effect of a combination of two elbows on a particle roping in pneumatic conveying. **Powder Technology**. v. 107, p. 226-233, 2000.

SILVA, D. R. **Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**. São Paulo: Artliber Editora, 2005. 172p.

SILVA, E. M. V. **Desenvolvimento e análise fluidodinâmica de um sistema de transporte pneumático vertical com alimentadores tipo jorro e parafuso rosca sem fim**. 1997. 144 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1997.

SILVA, E. M. V., FERREIRA, M. C., FREIRE, J.T. Fluid dynamics behavior of a pneumatic bed with a spouted bed type solid feeding system. **J. of the Braz. Soc. Mechanical Science**. Brazil, v.18, n.1, p.67-73, 1996.

SMOLDERS, K., BAEYENS, J. The operation of L-valves to control standpipe flow. **Advanced Powder Technology**. v.6, n.3, p. 163-176, 1995.

SOUSA, R. C. **Estudo fluidodinâmico e térmico no transportador pneumático com alimentador tipo jorro**. 2009. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2009.

VAN ENGELANDT, G., DE WILDE, J., HEYNDERICKX, G. J., MARIN, G. B. Experimental study of inlet phenomena of 35° inclined non-aerated and aerated Y-inlets in a dilute cold-flow riser. **Chemical Engineering Science**. v.62, p. 339-355, 2007.

WILLIAMS, K., JONES, M. G. Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems: A review. **Particuology**. v.6, p. 289-300, 2008.

YAN, A., PÄRSSINEN, J. H., ZHU, J. Flow properties in the entrance and exit regions of a high-flux circulating fluidized bed riser. **Powder Technology**. v.131, p. 256-263, 2003.

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

YANG, W., KUAN, B. Experimental investigation of dilute turbulent particulate flow inside a curved 90° bend. **Chemical Engineering Science**. v.61, p. 3593-3601, 2006.

YOU, J., WANG, D., ZHU, C. Entrance effects on gas-solid riser flow structure. **Ind. Eng. Chem. Res.** v.48, p. 310-319, 2009.

YOUSFI, Y., GAU, G. Aerodynamique de l'écoulement vertical de suspensions concentrées gas-solides-I: Régimes d'écoulement et stabilité aerodynamique. **Chemical Engineering Science**, v. 29, p. 1939-1946, 1974.

ANEXO I

Levantamento Bibliográfico acerca de alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático.

Ref.	Objetivo	Riser		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [µm]	Densidade [kg/m ³]
Knowlton e Hirsan (1978)	Caracterização de uma válvula-L inserida num sistema composto por: transporte pneumático vertical, reservatório de sólidos, tubo de descida e válvula-L.	76,2	-	Válvula-L	Vertical:	Areia	510	2116
					38,1		260	
					50,8		200	
					76,2		190	
					152,4		170	
					Horizontal:	Carvão	560	1233
38	Siderita	660	4149					
51								
76								
Geldart e Jones (1991)	Caracterização de uma válvula-L isolada.	-	-	Válvula-L	40	Areia	280	2645
					70		500	2604
					100		790	2661

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [μm]	Densidade [kg/m^3]
Rhodes e Laussmann (1992)	Verificação da influência das variáveis operacionais de um leito fluidizado circulante na perda de carga de cada região que compõe este leito.	152	4,0	Válvula-L	100	Alumina não porosa (FRF5)	74,9	2456
Littman <i>et al.</i> (1993)	Desenvolvimento de um modelo unidimensional para o escoamento diluído acelerado e não acelerado de um leito pneumático.	28,45	5,49	Leito de jorro	-	Esferas de vidro	1000	2500

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [µm]	Densidade [kg/m ³]
Smolders e Baeyens (1995)	Caracterização de uma válvula-L isolada.	-	-	Válvula-L	Vertical: 20 25 30 40 Horizontal: 200 300 400	Areia	137	2600
							190	
							260	
							406	
							607	
							755	
							850	
							950	
							1490	
						Esferas de vidro	450	2500
						Calcário	2000	2600
Ferreira (1996)	Desenvolvimento de um leito pneumático com alimentador jorro.	53,4	3,0	Leito de jorro	-	Esferas de vidro	1100	2500

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [μm]	Densidade [kg/m^3]
Grbavčić <i>et al.</i> (1997)	Formulação de um modelo numérico unidimensional para a região de aceleração de um leito pneumático.	30	4,4	Leito de jorro	-	Esferas de vidro	1940	2507
Chenget <i>et al.</i> (1998)	Estudo de diferentes configurações da região de entrada e saída.	186	3,0	Tubo inclinado	-	Catalisador FCC	54	1398

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [µm]	Densidade [kg/m ³]
Arena <i>et al.</i> (1998)	Verificação da influência do diâmetro e densidade da partícula na operação de uma válvula-L de pequeno diâmetro inserida num CFB.	41	3,6	Válvula-L	27	Catalisador FCC	68	1770
						Areia	73 156 341	2550
						Magnetita	170	4460
Osti (2003)	Analisar o comportamento operacional de um sistema com leito de jorro e diferentes bocais de redução.	24,3	1,5	Leito de jorro	-	Esferas de vidro	1000 1700	2500

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [µm]	Densidade [kg/m ³]
Yan et al. (2003)	Estudo numérico tridimensional das propriedades de escoamento nas regiões de entrada e saída de um leito fluidizado circulante sob com fluxos de sólidos elevados.	76	10	Tubo inclinado	-	Catalisador FCC	67	1500
Costa et al. (2004)	Avaliação da transição entre as fases densa e diluída para diferentes alimentadores de sólidos.	81,4 104,8 147	-	→Leito de jorro →Parafuso helicoidal →Tubo inclinado	-	Esferas de vidro	1000 1700 2850	2500

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [μm]	Densidade [kg/m^3]
Feltran (2005)	Caracterização de uma válvula-L de pequeno diâmetro e análise do desempenho desta num transportador pneumático.	23	1,95	Válvula-L	23	Esferas de vidro	260 470 1000	2500
De Wilde <i>et al.</i> (2005)	Avaliar numericamente a influência da configuração de entrada na estrutura de escoamento de um leito fluidizado circulante.	100	8,765	Tubo inclinado	80	Catalisador FCC	77	1550

Ref.	Objetivo	<i>Riser</i>		Alimentador de sólidos		Partículas		
		Diâmetro [mm]	Comprimento [m]	Tipo	Diâmetro [mm]	Tipo	Diâmetro [μm]	Densidade [kg/m^3]
Van engelandt <i>et al.</i> (2007)	Estudo da entrada de sólidos num tubo inclinado com e sem aeração num CFB.	100	8,765	Tubo inclinado	80	Catalisador FCC	77	1550
Kim <i>et al.</i> (2008)	Estudo das influencias das configurações da alimentação e da saída de um <i>riseno</i> escoamento gás-sólido.	50	4,5	→Selo reverso →Válvula-L →Válvula-J	-	Catalisador FCC	70	1740
Youet <i>al.</i> (2009)	Estudo numérico do efeito da entrada na estrutura de escoamento e estabilidade de um <i>riser</i> .	100	-	→Válvula-J →Válvula-L	-	Catalisador FCC	60	1440