

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DE OLIVEIRA E APROVADA
COMISSÃO JULGADORA EM 15 03 01.

Araí Augusta Bernárdez Pécora
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Estudo Experimental de uma Válvula Cônica para Controle da Descarga de Sólidos em Leito Fluidizado

Autor: **Júlio César Dainezi de Oliveira**
Orientadora: **Prof^a. Dr^a. Araí Augusta Bernárdez Pécora.**

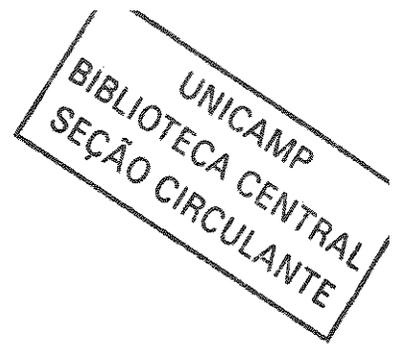
31/01

2002.01339



UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP		
	064e		
V.	Ex.		
TOMBO BC/	47148		
PROC.	16-837102		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	12-01-2002		
N.º CPD			

CM00162407-3



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

Estudo Experimental de uma Válvula Cônica para Controle da Descarga de Sólidos em Leito Fluidizado

Autor: Júlio César Dainezi de Oliveira
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arai Augusta Bernárdez Pécora.

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2001
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

OL4e

Oliveira, Júlio César Dainezi de

Estudo experimental de uma válvula cônica para controle da descarga de sólidos em leito fluidizado / Júlio César Dainezi de Oliveira. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadora: Araí Augusta Bernárdez Pécora.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Escoamento bifásico. 2. Fluidização. 3. Planejamento experimental. I. Bernárdez Pécora, Araí Augusta. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo Experimental de uma Válvula Cônica para
Controle da Descarga de Sólidos em Leito Fluidizado**

Autor: Júlio César Dainezi de Oliveira

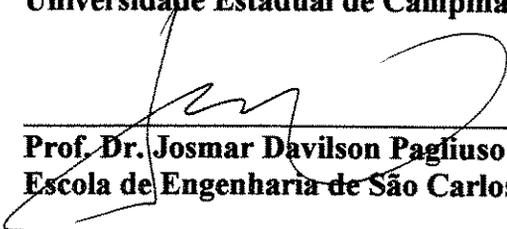
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arai Augusta Bernárdez Pécora.



**Prof^a. Dr^a. Arai Augusta Bernárdez Pécora., Presidente
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - DETF**



**Prof. Dr. Waldir A. Bizzo
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - DETF**



Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso

Escola de Engenharia de São Carlos - Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos - NETeF

Campinas, 15 de março de 2001

Dedicatória:

Dedicar este trabalho a uma única pessoa seria injusto, portanto, presto minha homenagem em especial:

A **Deus** - Senhor nosso Pai, acreditando que todas coisas provêm da bondade do poder de tuas mãos e que nada realizaremos se não formos regados e agraciados pelo dom da inteligência, minhas mãos e meu coração se abrem em agradecimento pelas bençãos que me concedes.

Aos meus amados pais, Francisco e Yolanda e minha sogra Zara, e pelo amor e carinho que me dedicam.

A minha eterna namorada Ana Leda, pelo amor, incentivo e presença ao meu lado.

Aos meus irmãos Aristóteles, Wagner e a Ana Cláudia, pelo carinho e amizade.

Aos verdadeiros amigos que possuo, cujos nomes não citarei na esperança de aumentar este grupo seleta.

Agradecimentos

Agora presto meus profundos agradecimentos as pessoas que tornaram este trabalho possível:

A minha orientadora Araí pela amizade e muita dedicação e aos demais docentes do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, que com grande competência nos elevaram aos altos níveis de conhecimentos, dissipando nossas dúvidas e erros, expresso-lhes minha estima e gratidão.

Aos bons amigos de estudos e pesquisas do DETF - FEM, em especial à Alex Álisson Bandeira Santos e Édna Santiago Benta, pela inestimável ajuda na coleta de dados e Antonio Neiva pelo empréstimo de equipamento.

Aos técnicos Daniel Celente, Luiz Zanga, Jefferson Souza e Gama pela colaboração na fabricação dos componentes, montagem do conjunto experimental e coleta de dados experimentais.

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Disse lhes Jesus: Eu sou o caminho,
e a verdade e a vida; ninguém
vem ao Pai, senão por mim.

(João 14:6)

Resumo:

OLIVEIRA, Júlio César Dainezi de, *Estudo Experimental de uma Válvula Cônica para Controle da Descarga de Sólidos em Leito Fluidizado*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 86 p. Dissertação (Mestrado)

Equipamentos de alimentação de sólidos particulados são fundamentais em sistemas gás-sólido, em processos como secagem em leito fluidizado, transporte pneumático, combustão de carvão, gaseificação de biomassa e reações de síntese em leitos fluidizados.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e o estudo experimental de uma nova geometria de válvula, denominada válvula cônica, adequada para controle da descarga de sólidos particulados quentes provenientes de reatores com leito fluidizado. A válvula em estudo foi acoplada à parede de um combustor operando com leito fluidizado, permitindo o controle da descarga de partículas sólidas quentes em direção a um trocador de calor também operando em regime de leito fluidizado. Ela consiste basicamente de uma haste central com extremidade cônica que se movimenta no interior de um tubo. A haste central possui circulação interna de água de resfriamento além de possuir injeção de ar pressurizado que escoava através da haste sendo ejetado na superfície lateral do cone para o arraste das partículas.

O levantamento da literatura sobre fatores que influem na descarga de sólidos particulados através da válvula foi efetuado como base para a realização de um planejamento experimental de dois níveis, que permitiu calcular o número de ensaios necessários para identificar o efeito de cada variável sobre o processo estudado.

Foram analisadas as influências das seguintes variáveis sobre a descarga de sólidos através da válvula: razão entre as áreas de abertura e do tubo de entrada da válvula, queda de pressão entre as suas extremidades; diâmetro médio do material particulado e temperatura do leito fluidizado no combustor.

A utilização de técnicas estatísticas básicas para a realização do planejamento experimental possibilitou o estudo de diversas variáveis simultaneamente e as influências dessas sobre as variáveis de resposta.

A análise dos resultados mostrou que a descarga de sólidos sofre influência estatisticamente significativa dos fatores: razão entre as áreas de abertura e do tubo de entrada da válvula e queda de pressão entre as extremidades da válvula.

Palavras Chave

- Escoamento Gás-Sólido; Válvula de Alimentação; Planejamento Fatorial; Controle da Descarga de Sólidos Particulados; Estudo Experimental.

Abstract:

OLIVEIRA, Júlio César Dainezi de, *Experimental Study of a Cone Valve to the Mass Flow Rate Control of Particles in a Fluidized Bed*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 86 p. Dissertação (Mestrado)

Feed valve are essential devices in gas-solid systems, in process as fluidized bed drying, pneumatic transport, coal combustion, biomass gasification and synthesis reactions in fluidized beds. All require a feed valve for the particulate solid to control the mass flow rate entering and/or leaving the process.

This work presents the development and the experimental study of a new solid feed valve design, named cone valve, suitable for controlling mass flow rate of hot solid particles leaving a fluidized bed reactor.

The proposed device was connected to the wall of a fluidized bed combustor, allowing mass flow rate control of the hot solid particles leaving the reactor towards a fluidized bed heat exchanger. The developed cone valve has basically a central shaft with conical extremity moving inside a tube. Cooling water flows inside this central shaft besides pressurized air injection flowing internally towards the cone lateral surface.

Literature review showed factors that have some influence on the solid mass flow rate control across the cone valve allowing a statistical analysis procedure in order to identify the effect of each factor on the process.

The following variables were investigated: ratio between opening area/transversal tube area at the valve entrance; pressure gradient difference between the valve extremities; particle diameter and temperature of the fluidized bed.

Application of a fundamental statistical method for planning the experimental procedure allowed simultaneous study of several variables and the identification of their influence on the feeder valve performance.

The analysis of results showed that the mass flow rate through the valve has a statistically significant influence from the factors: ratio between opening area and pipe diameter at the valve entrance and valve pressure difference between the valve extremities.

Keywords

Gas-solids Flow; Feeder Valve; Factorial Planning; Solid Mass Flow Rate Control; Experimental Study.

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
Nomenclatura	vii
1 Introdução	1
2 Estado da Arte	5
2.1 Fluidização	6
2.2 Válvulas de Alimentação	11
2.2.1 Válvulas não Mecânicas	14
2.2.2 Válvulas Mecânicas	27
3 Metodologia e Descrição do Sistema Experimental	34
3.1 Caracterização das Partículas	35

3.1.1 Distribuição Granulométrica	35
3.1.2 Massa Específica	36
3.2 Planejamento Fatorial	36
3.3 Conjunto Experimental	40
3.3.1 Câmara de Combustão	42
3.3.2 Válvula Pneumática para Alimentação de Sólidos Particulados	43
3.3.3 Válvula Cônica	44
3.3.4 Instrumentação	51
3.4 Procedimento Experimental	52
4 Resultados e Discussões	54
4.1 Interpretação dos Efeitos Obtidos	58
4.1.1 Interpretação sobre os Efeitos para a Descarga de Sólidos	59
5 Conclusões de Sugestões para Trabalhos Futuros	72
Referências Bibliográficas	74
Anexo I - Distribuição Granulométrica	80
Anexo II - Planilha para Cálculo dos Efeitos dos Fatores e Interações	81

Anexo III - Análise de Incerteza

84

Anexo IV - Tabela de Valores do Parâmetro "t" de Student

86

Lista de Figuras

1.1	Modos de Contato Gás-Sólido	2
2.1	Queda de Pressão em Função da Velocidade Superficial do Gás	7
2.2	Diagrama de Classificação de Partícula	10
2.3	Modelos de Válvulas para Alimentação de Sólidos Particulados	11
2.4	Configuração de Aplicação de Válvula L	14
2.5	Modos de Escoamento em Diferentes Vazões de Gás de Aeração	15
2.6	Perfil Típico de Queda de Pressão em LFC com Válvula L	17
2.7	Descarga de sólidos em Função da Área	22
2.8	Aplicações Típicas de Válvulas Mecânicas	28
2.9	Curva Típica de uma Válvula Rotativa	30
2.10	Características Geométricas de uma Rosca Transportadora	32
3.1	Conjunto Experimental	40
3.2	Visão do Conjunto Experimental	42
3.3	Esquema da Câmara de Combustão e dos Bicos Injetores	43
3.4	Esquema da Válvula Pneumática	44
3.5	Válvula Cônica Original, sem alterações no projeto	45
3.6	Válvula Cônica Modificada	46
3.7	Operação Cíclica da Válvula em Elevadas Descargas	47
3.8	Flutuação da P2 com Anteparo	48
3.9	Apresentação da Válvula Cônica	49
3.10	Representação da Área do Orifício	50

4.1	Diagrama para Interpretação dos Efeitos da A_o/A_t e $\bar{d}p$ sobre \dot{M}_s	60
4.2	Diagrama para Interpretação dos Efeitos ΔP_v e $\bar{d}p$ sobre \dot{M}_s	61
4.3	Diagrama para Interpretação dos Efeitos da A_o/A_t e T_L sobre \dot{M}_s	62
4.4	Diagrama para Interpretação dos Efeitos ΔP_v e T_L sobre \dot{M}_s	63
4.5	Diagrama para Interpretação dos Efeitos A_o/A_t e ΔP_v sobre \dot{M}_s	65
4.6	Superfície de Resposta para \dot{M}_s ($\bar{d}p$ [-1] e T_L [-1])	66
4.7	Superfície de Resposta para \dot{M}_s ($\bar{d}p$ [-1] e T_L [+1])	67
4.8	Superfície de Resposta para \dot{M}_s ($\bar{d}p$ [+1] e T_L [-1])	67
4.9	Superfície de Resposta para \dot{M}_s ($\bar{d}p$ [+1] e T_L [+1])	68
4.10	Descarga de sólidos em Função da Razão A_o/A_t	70
4.11	Queda de pressão no tubo de saída da válvula em função da descarga de sólidos	71

Lista de Tabelas

2.1	Configurações e Características de Válvulas de Alimentação	13
3.1	Níveis dos Fatores	37
3.2	Matriz de Planejamento com os Coeficientes de Contraste	38
3.3	Equipamentos Auxiliares e suas Características	41
4.1	Matriz de Planejamento em Dois Níveis Completa	55
4.2	Resultados Obtidos através do Planejamento Fatorial	56
4.3	Resultado das Estimativas dos Efeitos e da Avaliação Estatística desses	58
4.4	Resultados dos Experimentos Adicionais	69

Nomenclatura

Letras Latinas

A	Área	[m ²]
A_e	Área de entrada, Equação (2.24)	[m ²]
A_{ef}	Área efetiva do orifício	[m ²]
A_F	Fator de área, Equação (2.23)	[-]
C_d	Coefficiente de descarga	[-]
d	Diâmetro	[m]
\bar{d}_p	Diâmetro médio da partícula	[m]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G_s	Fluxo de sólidos	[kg/m ² s]
h	Altura da seção de saída, Equação (2.14)	[m]
h_s	Posição de saída do tubo em relação à placa distribuidora	[m]
H	Altura do leito	[m]
k	Constante adimensional, Equação (2.17 e 2.22)	[-]
L	Comprimento da seção horizontal da válvula L	[m]
L_F	Fator de comprimento, Equação (2.23)	[-]
L_R	Comprimento total da rosca transportadora	[m]
L_t	Comprimento do tubo	[m]
\dot{M}_s	Descarga de sólidos	[kg/s]
M_s	Massa de sólidos	[kg/s]
n_p	Número de pás	[-]

N	Rotação do eixo	[rpm]
P	Passo de uma rosca	[m]
P_f	Pressão na câmara de expansão	[kPa]
P_{mont}	Pressão a montante da válvula cônica	[kPa]
$P_{saída}$	Pressão na saída do tubo, Equação (2.19)	[kPa]
\bar{q}	Média aritmética	[-]
\bar{q}^+	Resposta média para o nível superior	[-]
\bar{q}^-	Resposta média para o nível inferior	[-]
Q	Vazão	[m ³ /s]
Q_T	Vazão total	[m ³ /s]
Q_{era}	Vazão de aeração	[m ³ /s]
r_b	Raio da parte inferior da seção de saída	[m]
R_e	Raio do eixo	[m]
R_p	Raio da pá	[m]
S_{qk}^2	Variância	[-]
S_{exp}^2	Variância experimental	[-]
S_{ef}	Erro padrão de um efeito	[-]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura	[°C]
U	Velocidade superficial do gás	[m/s]
U_{aer}	Velocidade do gás de aeração	[m/s]
U_{gb}	Velocidade do gás na parte inferior da seção de saída	[m/s]
U_{pb}	Velocidade da partícula na parte inferior da seção de saída	[m/s]
U_t	Velocidade terminal da partícula	[m/s]
V	Volume	[m ³]
w	Erro relativo	[kg/h]

Letras Gregas

α	Ângulo da seção de saída	[°]
β	Coefficientes do modelamento estatístico	[-]

ε	Porosidade	[-]
ϕ	Esfericidade da partícula	[-]
ΔP	Queda de pressão	[kPa]
ΔP_{ep}	Queda de pressão através da coluna principal	[kPa]
ΔP_c	Queda de pressão através do ciclone	[kPa]
η_v	Eficiência volumétrica	
μ	Viscosidade	[Ns/m ²]
θ	Ângulo entre o tubo a horizontal	[°]
θ_f	Fator de inclinação, Equação (2.23)	[-]
θ_r	Ângulo de repouso, Equação (2.25)	[°]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

Subscritos

cr	Coluna de retorno
g	Gás
L	Leito
mf	Mínima fluidização
o	Orifício
p	Partícula
s	Sólido particulado
t	Tubo
v	Válvula

Abreviações

LFC	Leito fluidizado circulante
------------	-----------------------------

Capítulo 1

Introdução

A aplicação da tecnologia da fluidização em escala industrial data de 1926, quando entrou em operação o gaseificador de carvão Winkler. Entretanto, estudos sobre o controle de descarga de sólidos particulados tornaram-se foco de atenção em 1942, durante o aperfeiçoamento do processo de craqueamento catalítico de hidrocarbonetos (FCC – *Fluid Catalytic Craking*), dando início aos sistemas de recirculação de sólidos. Tais sistemas culminaram, na década de 70, no desenvolvimento da tecnologia de Leito Fluidizado Circulante (LFC), que possui aplicação relevante nos processos de craqueamento em refinarias de petróleo e de combustão de carvão em usinas termelétricas.

O interesse e o desenvolvimento de tecnologias envolvendo sistemas gás-sólidos podem ser observados atualmente pela ampla e intensa aplicação de processos como secagem, calcinação, resfriamento, combustão, gaseificação, recobrimento de comprimidos e reatores químicos específicos em indústrias químicas, petroquímicas, agrícolas, farmacêuticas e alimentícias. Esta gama de aplicações industriais explica-se em função dos diversos modos de contato gás-partícula possíveis, variando-se desde a condição de leito fixo até o transporte pneumático em fase diluída, que apresentam características fluidodinâmicas bastante diferentes entre si. Na Figura 1.1 estes modos de contato gás-partícula estão representados.

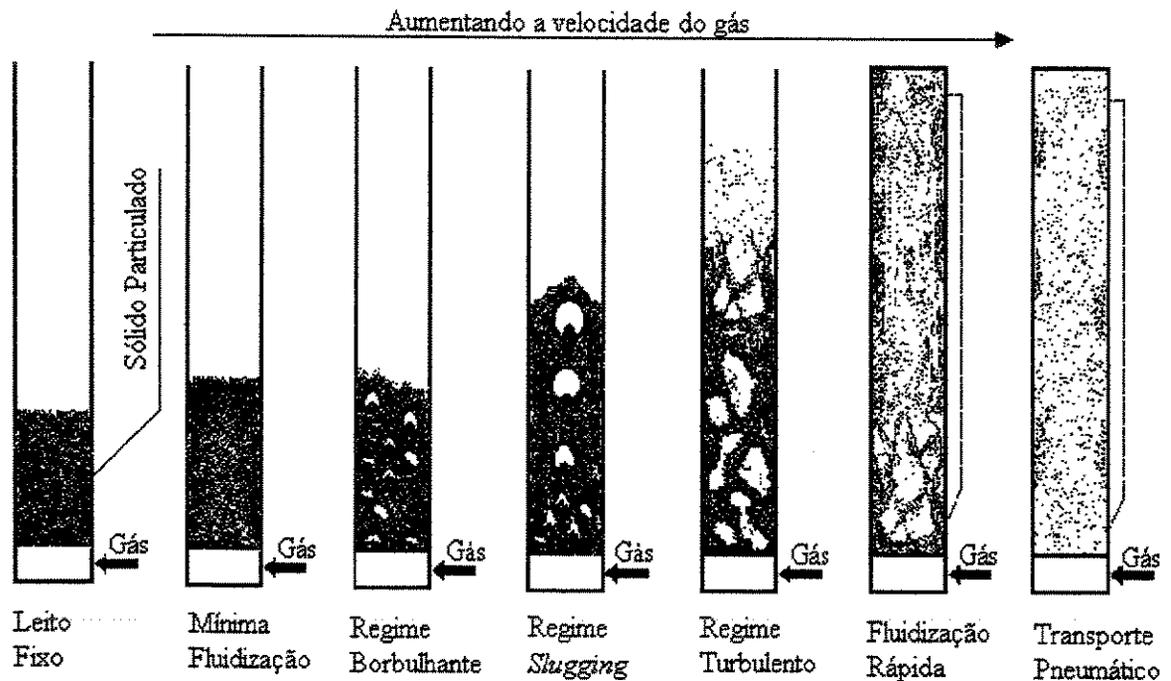


Figura 1.1 – Modos de contato gás-sólido (Grace, 1986).

O regime de fluidização é dependente da velocidade com que o gás percola os espaços intersticiais entre as partículas. O aumento da velocidade do gás aumenta a força de arraste sobre as partículas, que em determinado instante iguala-se à força gravitacional e o leito começa a expandir-se. A velocidade do gás em que a transição do modo leito fixo para o modo fluidizado ocorre é denominada de velocidade de mínima fluidização, U_{mf} .

O sucesso das atividades industriais que utilizam sistemas gás-sólidos está, em muitos casos, diretamente ligado à escolha do sistema responsável pela alimentação das partículas sólidas. A válvula ou mecanismo utilizado para esta alimentação deve ser efetivo e confiável no controle do fluxo de sólidos entrando em um recipiente. As deficiências e falhas no controle do fluxo de sólidos resultam em condições finais de operação adversas do previsto na fase de projeto dos equipamentos, o que claramente gera maiores custos de produção e de consumo de energia.

Merrow (1985) publicou o resultado de uma pesquisa envolvendo plantas de processo, em indústrias químicas e petroquímicas, construídas entre as décadas da 60 e 80 onde verificou

desempenhos semelhantes mesmo considerando o avanço tecnológico das mais recentes. O desempenho da planta foi estimado considerando quão bem a mesma operava em relação ao previsto na fase de projeto. A necessidade dessa pesquisa surgiu em função da constatação de que plantas envolvendo o processamento de sólidos apresentaram eficiências globais menores do que plantas envolvendo apenas gases e líquidos. De um total de 37 indústrias acompanhadas, somente 6% não apresentaram problemas graves, que resultaram na parada do processo por uma semana ou mais. A análise dos dados levantados por Merrow demonstra que as principais causas de parada de operação em plantas de processo estão mais relacionadas aos problemas mecânicos e físicos do que às etapas químicas da operação. O autor observou ainda que 52% das falhas de operação eram provenientes de problemas advindos do processo de transferência do material sólidos de um local a outro, evidenciando a necessidade de pesquisas nessa área.

A revisão da literatura mostra que entre 1985 e 1999 muitas pesquisas foram realizadas visando o desenvolvimento de válvulas de alimentação para sistemas gás-sólidos mais eficientes, destacando-se as pesquisas envolvendo válvulas não mecânicas.

O objetivo da atual pesquisa é o desenvolvimento de uma válvula, denominada válvula cônica, e o estudo experimental do seu comportamento através da observação dos efeitos das variáveis envolvidas na operação de descarga de sólidos particulados.

A válvula em questão foi desenvolvida com a finalidade de efetuar-se o controle da descarga de sólidos particulados deixando um leito fluidizado operando em temperaturas elevadas.

Almejando atingir os objetivos de maneira eficiente e precisa foram definidas etapas de trabalho como a revisão da literatura, que norteou os estudos e determinou a escolha dos fatores que afetam a operação de válvulas de controle de sólidos particulados, e o planejamento experimental, que possibilitou a otimização dos experimentos. As variáveis envolvidas e controladas foram:

- a) Razão entre a área de abertura da válvula e a área do tubo de entrada (A_o/A_t);
- b) Queda de pressão entre as extremidades da válvula (ΔP_v);
- c) Diâmetro médio das partículas (\bar{d}_p);
- d) Temperatura do leito fluidizado (T_L);

A proposição de uma correlação para prever a descarga de sólidos através da válvula cônica em função de sua geometria e de algumas variáveis de operação também é objetivo do presente trabalho.

Capítulo 2

Estado da Arte

A alimentação de sólidos particulados ou a saída de material sólido de um reator operando com leito fluidizado pode ser realizada de várias maneiras com diferentes princípios de operação. A escolha, o projeto e o desenvolvimento do sistema de alimentação devem ser direcionados à eliminação de problemas ou dificuldades impostas pelo escoamento do material particulado.

A escolha de um equipamento adequado para uma aplicação específica torna-se tarefa menos árdua quando se dispõe de um conjunto de informação sobre o processo em que tal equipamento irá operar. A enumeração de questões pertinentes ao processo é uma maneira prática e eficiente de se obter as informações necessárias para a escolha preliminar de um sistema de alimentação, como as apresentadas a seguir:

- a) Quais as propriedades do sólido particulado e do material de construção da válvula?
- b) Quais as condições de projeto e de operação?
- c) Qual a aplicação industrial envolvida?
- d) Como a diferença de pressão entre as extremidades da válvula de alimentação influencia a descarga de sólidos através dela?
- e) Qual a vazão de ar disponível?

A literatura relata a aplicação desde mecanismos simples como orifícios a mais complexos como válvulas de esfera atuadas pneumaticamente, para controle da descarga de sólidos.

particulados.

Diversos estudos apresentam correlações empíricas para prever a descarga de sólidos e a queda de pressão através dos sistemas de alimentação, que em geral possuem aplicação restrita às condições de operação e à geometria estudada.

A revisão da literatura apresenta um levantamento de trabalhos publicados, até o ano de 2000, que referem-se a sistemas de alimentação envolvendo válvulas mecânicas e não mecânicas. A revisão da literatura engloba também aspectos básicos da engenharia da fluidização, como os conceitos de velocidade de mínima fluidização e queda de pressão através do leito fluidizado, que serão úteis no entendimento dos fenômenos envolvidos.

2.1 - Fluidização

Como mencionado no Capítulo 1 a fluidização basicamente é o contato de partículas sólidas com uma corrente ascendente de gás ou líquido. A velocidade na qual essa corrente percola o leito de partículas é que define os vários modos de fluidização, desde o leito fixo ao transporte pneumático em fase diluída.

A Figura 2.1 apresenta o gráfico da variação da queda de pressão através do leito de partículas sólidas em função da velocidade superficial do gás. A observação da figura mostra que a queda de pressão no leito fixo é proporcional à velocidade do gás de fluidização até o ponto onde um valor máximo é atingido. A velocidade do gás nesse ponto é denominada velocidade de mínima fluidização, e a partir desse momento a suspensão gás-sólido comporta-se como um fluido. O aumento da velocidade do gás além desse ponto altera a porosidade do leito, aumentando-a, resultando em um leve decréscimo da queda de pressão, que então permanece praticamente constante até o início do transporte pneumático das partículas.

A queda de pressão através do leito fluidizado (ΔP_L) é devida ao peso das partículas sólidas podendo ser equacionado da seguinte maneira:

$$\Delta P_L = (1 - \epsilon)(\rho_p - \rho_g)gH \Rightarrow \Delta P_{mf} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)gH_{mf} \quad (2.1)$$

onde

g aceleração devido à gravidade;

H ; H_{mf} altura do leito fluidizado e altura do leito na condição de mínima fluidização, respectivamente;

ε ; ε_{mf} porosidade do leito fluidizado e porosidade do leito na condição de mínima fluidização, respectivamente;

ρ_g ; ρ_p massa específica do gás e massa específica do sólido, respectivamente.

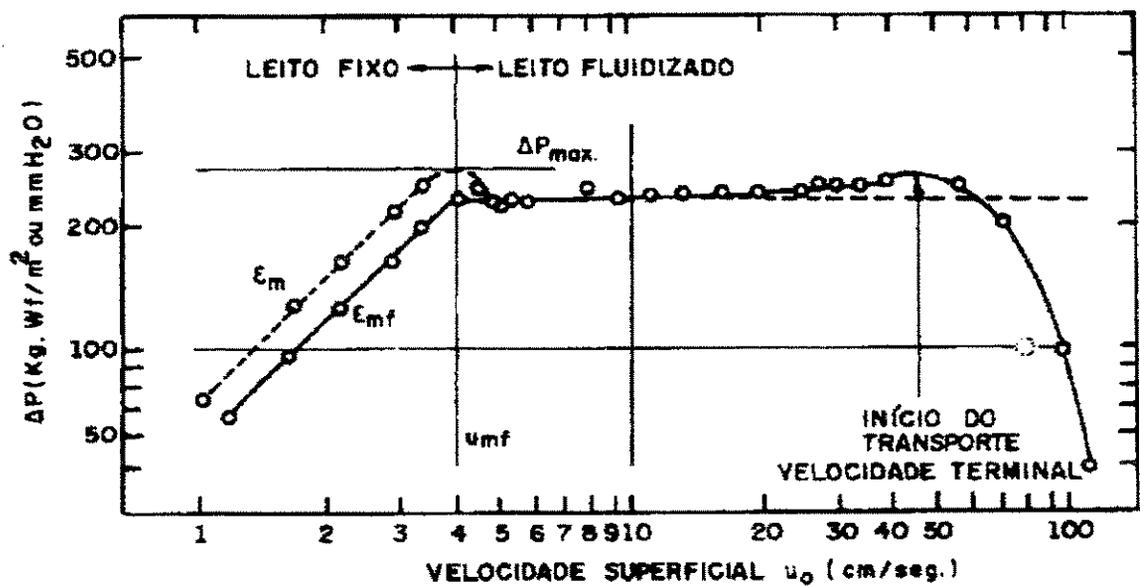


Figura 2.1 – Queda de pressão em função da velocidade superficial do gás (Kunii e Levenspiel, 1991).

A queda de pressão em equipamentos operando com leito fluidizado foi estudada por diversos pesquisadores. Da Silva e Pécora (1990) desenvolveram um estudo para orientar na seleção das correlações mais difundidas e aceitas na área, além de um programa que apresentava os resultados da queda de pressão em cada componente do sistema fluidizado visando à obtenção da potência necessária do soprador. Na condição de mínima fluidização é possível a obtenção da queda de pressão no leito através da equação de Ergun (Kunii e Levenspiel, 1991).

$$\frac{\Delta P_{mf}}{H_{mf}} = 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{(\phi \bar{d}_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\phi \bar{d}_p} \quad (2.2)$$

onde

\bar{d}_p diâmetro médio da partícula;

U_{mf} velocidade superficial do gás na condição mínima fluidização;

ϕ esfericidade da partícula;

μ_g viscosidade do gás.

Na extremidade direita da Figura 2.1 tem-se o ponto de início de arraste das partículas, caracterizando regimes de contato gás-sólido como o leito fluidizado rápido ou o transporte pneumático. O limite superior da velocidade superficial do gás que percola as partículas, sem que as mesmas sejam arrastadas do leito, é definido como velocidade terminal (U_t), que pode ser obtida a partir do balanço de forças atuando sobre uma partícula isolada, resultando na equação (2.3).

$$U_t = \left[\frac{4\bar{d}_p(\rho_p - \rho_g)g}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

onde

C_d coeficiente de arraste.

A porosidade de um leito fluidizado é definida como a fração entre o volume ocupado pelo gás e o volume do leito, assim:

$$\epsilon = \frac{V_L - V_p}{V_L} = 1 - \frac{M_s}{\rho_p A_L H} \quad (2.4)$$

onde

- V_L volume do leito;
- V_p volume das partículas;
- M_s massa de sólidos;
- A_L área da seção transversal do leito.

Experimentalmente, determina-se a porosidade a partir da medida da queda de pressão através do leito fluidizado, ou seja:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P_L}{g(\rho_p - \rho_g)H} \quad (2.5)$$

A utilização das equações anteriores para um leito fluidizado contendo uma mistura de partículas com diferentes diâmetros pode ser feita a partir da determinação do diâmetro médio das partículas.

O método mais utilizado para caracterizar o tamanho de partículas granulares é o de peneiramento, que permite a determinação do diâmetro médio de uma amostra contendo diferentes diâmetros de partículas (dp_i), através da obtenção do diâmetro médio de Sauter, definido como:

$$\bar{dp} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{dp_i}} \quad (2.6)$$

onde

x_i fração em massa dos sólidos com diâmetro dp_i , adimensional.

A caracterização da partícula juntamente com as condições de operação do gás é o responsável pelo comportamento dos sistemas fluidizados. Assim, Geldart (1973) sugeriu a classificação de partículas sólidas em quatro grupos, em função de seu diâmetro e da diferença

entre as massas específicas da partícula e do gás. Os grupos são mostrados na Figura 2.2 e abaixo estão resumidas as principais características de cada um deles.

- Grupo A: sólidos facilmente fluidizados, o particulado FCC é um exemplo típico de sólido que se enquadra neste grupo, tendo pequeno diâmetro e baixa massa específica. Apresentam fluidização homogênea antes do surgimento das primeiras bolhas.
- Grupo B: a maioria dos particulados utilizada correntemente está classificada neste grupo. A massa específica e o diâmetro da partícula apresentam valores intermediários, sendo a areia um exemplo típico. A fluidização é heterogênea, para velocidades logo acima da de mínima fluidização.
- Grupo C: a fluidização neste grupo é difícil de ser atingida em razão da característica dos particulados, abrangendo todos os pós-coesivos.
- Grupo D: neste grupo os sólidos apresentam diâmetro e massa específica elevados. O regime de fluidização preferencial é o de leito de jorro, caracterizado por um canal central por onde escoo o gás de fluidização.

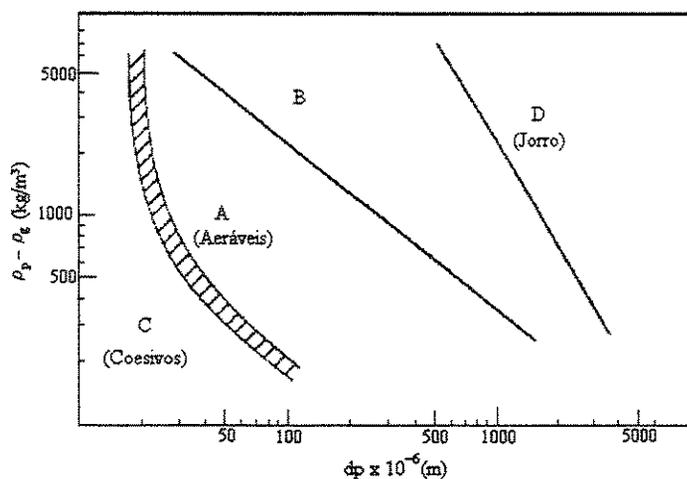


Figura 2.2 – Diagrama de classificação de partícula (Geldart e Williams, 1985).

Há outros aspectos sobre fundamentos da fluidização, não menos importantes, que não foram abordados aqui, contudo são assuntos já difundidos na literatura e de fácil entendimento através dos livros de autores como Geldart (1986), Kunii e Levenspiel (1991) e Davidson, Clift e Harrison (1985).

2.2 – Válvulas de alimentação

As diversas operações industriais envolvendo sistemas gás-sólidos requerem que a alimentação ou a descarga de sólidos particulados seja homogênea, para que as etapas do processo possam ser realizadas dentro das expectativas de projeto. Há vários equipamentos disponíveis e testados para a execução dessas tarefas. A escolha da válvula a ser aplicada no controle de sólidos deve ajustar-se a cada situação de operação. Na calcinação, por exemplo, onde o sólido é um dos reagentes, a válvula deve garantir uma alimentação contínua e em pequenas quantidades para que a reação seja controlada dentro do reator, enquanto que para uma unidade de craqueamento catalítico a alimentação não precisa ser contínua e maiores descargas são utilizadas.

A Figura 2.3 apresenta, esquematicamente, alguns dos modelos de válvulas mais utilizados para o controle de alimentação de sólidos particulados. Os modelos não mecânicos são as válvulas tipo L (a), J (b), selo reverso (c) e tipo V (d). Os modelos mecânicos mostrados são as válvulas rotativas tipo palheta (e) e borboleta (f), o parafuso transportador (g) e a válvula tipo cônica (h).

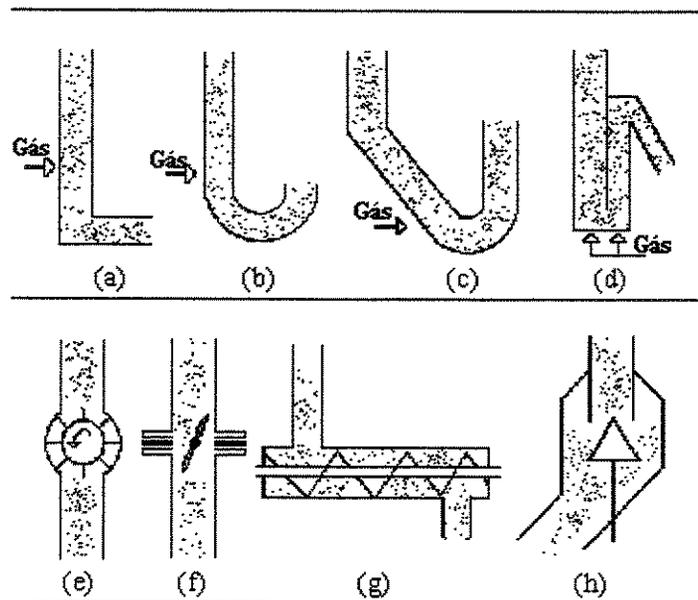


Figura 2.3 – Modelos de válvula para alimentação de sólidos particulados.

As válvulas não mecânicas são equipamentos de construção simples e baixo custo. Os princípios de operação e de projeto de uma válvula não mecânica são os mesmos para os diversos modelos existentes. O controle da descarga de sólidos através de uma válvula não mecânica é função da geometria e da quantidade de gás injetado na válvula. Em geral, são montadas na parte inferior da coluna de retorno em um sistema de leito fluidizado circulante (LFC). As Válvulas não mecânicas operam melhor com material particulado do grupo B da classificação de Geldart.

O alimentador tipo palheta constitui-se basicamente do corpo da válvula e do conjunto rotor-pás, que gira em seu interior. O conjunto rotor-pás e o corpo da válvula formam compartimentos que transportam o particulado da entrada superior para a saída, posicionada na parte inferior do corpo. A descarga de sólidos é controlada pela velocidade de rotação do conjunto rotor-pás.

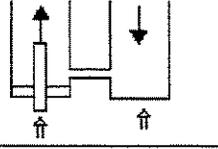
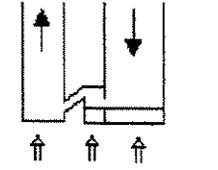
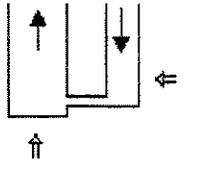
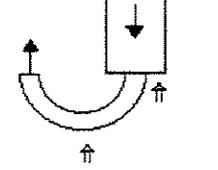
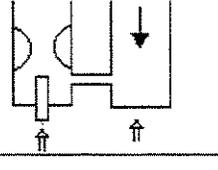
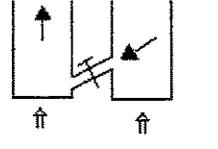
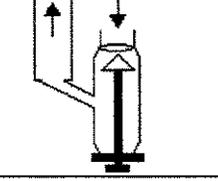
A válvula tipo borboleta controla a descarga de sólidos através do posicionamento do disco em torno de um eixo diametral, perpendicular à direção de escoamento do fluido. São empregadas principalmente em condições de baixas pressões e temperaturas moderadas, em função dos materiais não metálicos utilizadas na confecção da sede, que é responsável pela boa vedação da válvula.

O alimentador ou transportador tipo parafuso constitui-se de um parafuso com rosca de perfil alto, que ao girar no interior do corpo da válvula empurra o particulado por ação conjunta da superfície da rosca e do corpo da válvula sobre as partículas. Como no caso da válvula palheta, a descarga é controlada principalmente pela velocidade de rotação da rosca.

A válvula tipo cônica controla a descarga de sólidos em função da regulagem da posição do cone em relação à sede de assentamento (orifício). Essa regulagem, em qualquer posição intermediária de fechamento do cone, permite estabelecer uma relação pré-determinada entre a abertura da válvula e a descarga.

Na tabela 2.1 estão resumidas configurações diferentes de válvulas para a alimentação de sólidos e suas principais características.

Tabela 2.1 – Configurações e características de válvulas de alimentação (Cheng, 1998).

Tipo de Entrada	Configuração	Principais Características
Entrada com orifício interno		<ul style="list-style-type: none"> - Fácil ajuste da descarga de sólidos; - Influência sobre a concentração de sólidos na coluna principal.
Válvula V e Selo Reverso		<ul style="list-style-type: none"> - Regime estável na operação; - Indicada para sólidos do grupo B; - Descarga de sólidos limitada; - Forte restrição de entrada.
Válvula L		<ul style="list-style-type: none"> - Fácil controle; - Simples construção; - Indicada apenas para sólidos do grupo B; - Ampla faixa de descarga; - Operação fortemente dependente da geometria e projeto da coluna de retorno.
Válvula J		<ul style="list-style-type: none"> - Fraca restrição de entrada; - Influência significativa sobre a concentração de sólidos na coluna principal.
Venturi		<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da aceleração das partículas; - Descarga de sólidos limitada.
Entrada inclinada com válvula mecânica		<ul style="list-style-type: none"> - Opera em regime fluidizado ou movente no tubo inclinado; - Fácil ajuste da descarga pela variação da abertura; - Operação menos estável em altas descargas.
Válvula cônica		<ul style="list-style-type: none"> - Fácil ajuste da circulação de sólidos pela variação da abertura; - Altas taxas de circulação; - Baixa queda de pressão através da válvula

→ Direção dos sólidos

⇒ Injeção de gás

2.2.1 – Válvulas não mecânicas

Válvulas não mecânicas apresentam como vantagens: a inexistência de partes móveis, minimização dos gastos de manutenção; baixo custo e fácil construção. Dentre as válvulas não mecânicas destacam-se as do tipo L e V, com aplicações em processos como combustão de carvão em leito fluidizado rápido, calcinação de alumina, linhas de transporte pneumático e regeneração de catalisadores em LFC. A posição de montagem típica de uma válvula L aplicada a um sistema fluidizado circulante é apresentada na Figura 2.4. Nesse sistema, a válvula L realiza a reinjeção de partículas sólidas na coluna principal de forma controlada. Sua presença influencia diretamente a fluidodinâmica da coluna principal (*riser*), pois a descarga de sólidos recirculados influi na queda de pressão através da válvula, afetando o balanço de pressão no circuito envolvendo coluna principal, ciclone, coluna de retorno e válvula de recirculação.

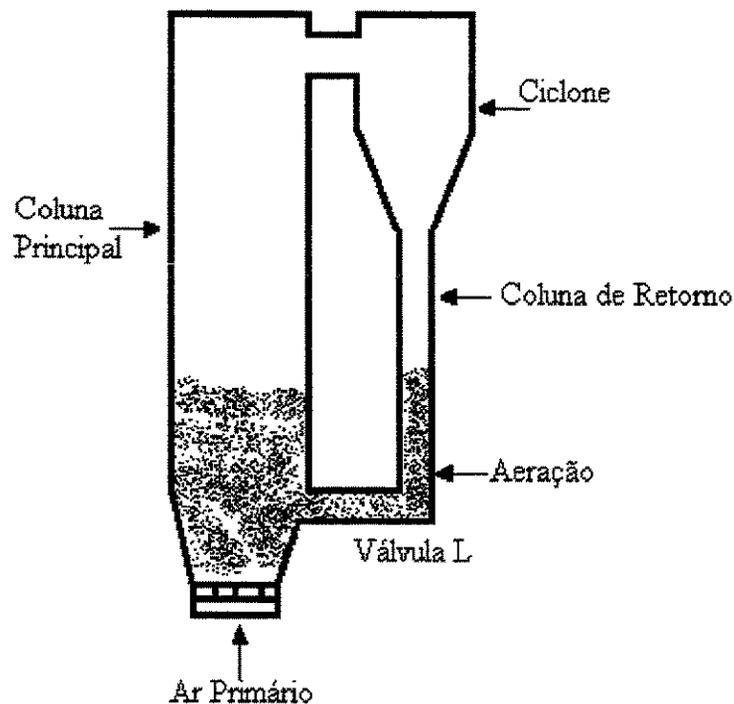


Figura 2.4 – Configuração de aplicação de válvula L

O escoamento de sólidos através de uma válvula L ocorre quando a força de arraste exercida sobre as partículas supera a força resistiva à passagem dos sólidos pelo cotovelo, como descrito por Knowlton e seu grupo de pesquisa (1988).

Knowlton e Hirsan (1978), caracterizaram os modos de escoamento de sólidos particulados em uma válvula L em função da vazão de gás de aeração, como mostrado na Figura 2.5. Verificaram que quando baixas vazões de gás são utilizadas a maior parte dos sólidos permanece estagnada na parte inferior e na seção horizontal da válvula, enquanto na parte superior horizontal ocorre um pequeno escoamento de sólidos (Figura 2.5 a). O aumento gradual da descarga de gás proporciona o aumento da área de escoamento dos sólidos até que se atinge toda a seção transversal da válvula L permitindo o controle mais eficaz do fluxo de sólidos. Verificaram também que a posição da tomada de aeração deveria ser o mais próximo possível do cotovelo da válvula, sendo esta posição determinante na descarga dos sólidos através da válvula.

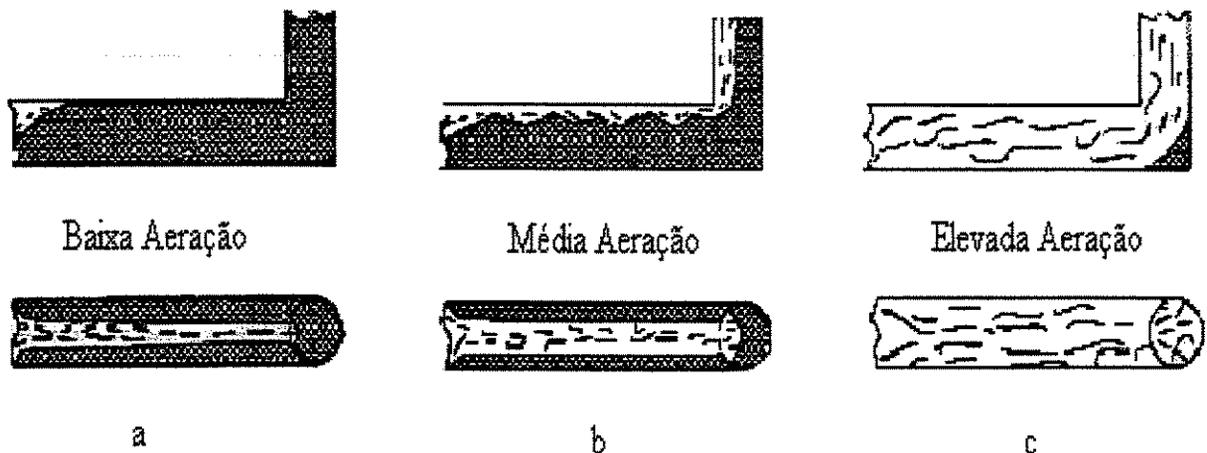


Figura 2.5 – Modos de escoamento em diferente descarga de gás de aeração (Knowlton e Hirsan, 1978).

Nessa investigação também foi observado que o gás que promovia o escoamento através da válvula L, ou qualquer outro modelo não mecânico, era o somatório do ar de aeração injetado na válvula (Q_{aer}) com a quantidade de gás arrastado pelas partículas através da coluna de retorno (Q_{cr}):

$$Q_T = Q_{aer} + Q_{cr} \quad (2.7)$$

Observaram que a quantidade de gás injetada necessária para a boa operação de uma válvula L aumentava com o aumento do tamanho e da massa específica da partícula e do diâmetro da seção vertical da válvula.

Segundo Knowlton e Hirsan (1978), o entendimento do balanço de pressão em um sistema circulante é fundamental no projeto, desenvolvimento e funcionamento de uma válvula não mecânica. Nesse sentido, Arena, Langeli e Cammarota (1998) realizaram o balanço de pressão em um leito fluidizado circulante operando com diferentes sólidos particulados. O conjunto experimental era composto da coluna principal, do ciclone, da coluna de retorno e da válvula L. O balanço de pressão no sistema pode ser equacionado da seguinte forma:

$$\Delta P_{cr} = \Delta P_v + \Delta P_{cp} + \Delta P_c \quad (2.8)$$

onde

ΔP_{cr} queda de pressão na coluna de retorno;

ΔP_v queda de pressão na válvula;

ΔP_{cp} queda de pressão na coluna principal;

ΔP_c queda de pressão no ciclone.

A seção da coluna de retorno acima do ponto de aeração é a parte dependente no sistema, sua queda de pressão ajusta-se para balancear a queda de pressão produzida pela soma das quedas de pressão do lado independente do sistema, composto pela coluna principal, ciclone e as seções vertical e horizontal da válvula L. A Figura 2.6 apresenta um perfil típico das quedas de pressão em um LFC com válvula L, onde o ponto 6 indica o local de maior pressão no sistema, representado pela injeção de ar de aeração.

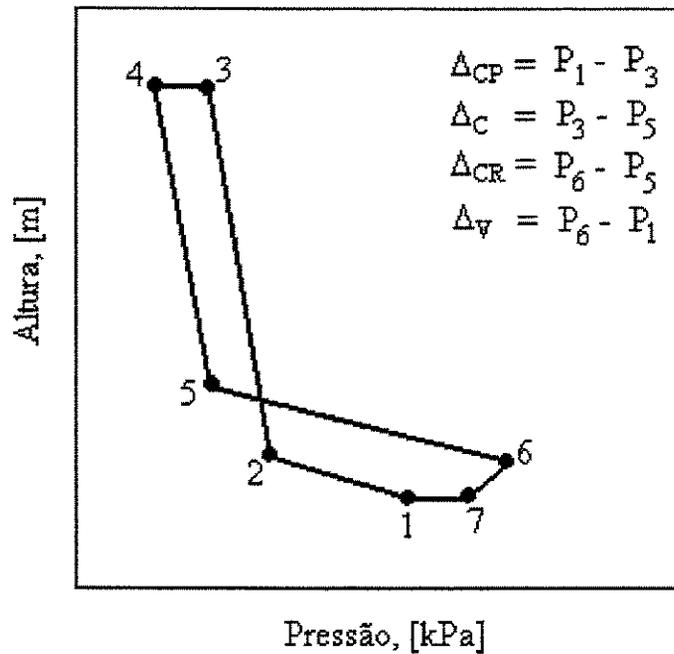


Figura 2.6 – Perfil típico de queda de pressão em LFC com válvula L (Arena *et al.*, 1998).

A influência do diâmetro e massa específica do sólido particulado, diâmetro e massa específica, sobre a descarga e a queda de pressão em válvulas não mecânicas do tipo L foi extensivamente estudada na literatura. Knowlton e Hirsan (1978), observaram que a queda de pressão através da válvula L é diretamente proporcional à massa específica da partícula e inversamente proporcional ao diâmetro da seção horizontal.

A variação na geometria de uma válvula L foi estudada por Geldart e Jones (1991), que constataram a influência do raio de curvatura da válvula e da inclinação do trecho horizontal sobre a descarga. A inclinação descendente da seção horizontal além de aumentar a capacidade de descarga da válvula melhorou o controle e a estabilidade do escoamento em baixas descargas. O raio de curvatura mais gradual também melhorou o controle em condições de mínima descarga e exigiu menos injeção de gás de aeração. Nesse estudo foi apresentado um conjunto de correlações para o projeto de uma válvula L, somente válido para sólidos particulados do grupo B da classificação de Geldart.

A partir de experimentos envolvendo areia, como material particulado, foi proposta a

seguinte correlação para a queda de pressão através da válvula L:

$$\frac{\Delta P_v}{L} = 216 * G_s^{0,17} * d_{cr}^{-0,63} * \bar{d}p^{-0,15} \quad (\text{S.I.}) \quad (2.9).$$

onde

L comprimento da seção horizontal da válvula L;

G_s fluxo de sólidos;

d_{cr} diâmetro da coluna de retorno.

Yang e Knowlton (1993) apresentaram um conjunto de equações em que relacionam a descarga de sólidos com as dimensões da válvula L, descarga de gás de aeração e queda de pressão, por meio de um procedimento iterativo. Estas equações foram desenvolvidas considerando a operação pneumática da válvula, em que o controle de abertura da válvula era feito pela injeção de gás. O desenvolvimento da correlação proposta por Yang e Knowlton baseou-se na equação de Jones e Davidson:

$$\Delta P_v = \frac{1}{2\rho_p(1 - \epsilon_{mf})} \left(\frac{\dot{M}_s}{C_d A_o} \right)^2 \quad (2.10)$$

onde

A_o área transversal de abertura da válvula;

\dot{M}_s descarga de sólidos particulados.

Nessa equação, a área transversal de abertura da válvula é desconhecida, sendo dependente da vazão de gás na válvula, que é determinada pela Equação (2.7), onde Q_{cr} pode ser calculado considerando que na coluna de retorno a suspensão gás-sólido está na condição de mínima fluidização, ou seja:

$$Q_{cr} = \frac{\dot{M}_s \varepsilon_{mf}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.11)$$

A solução da Equação (2.10) através da Equação (2.11) baseada nos dados experimentais resultou na correlação de Yang e Knowlton:

$$\frac{Q_{\tau}}{(\pi/4)d_v^2 L} = 1,9 + 7,64 \frac{U_t A_o}{(\pi/4)d_v^2 L} \quad (S.I.) \quad (2.12)$$

onde

d_v diâmetro interno da válvula.

Arena, Langeli e Cammarota (1998) estudaram o efeito do diâmetro e da massa específica de diferentes materiais pertencentes aos grupos A e B de Geldart sobre a descarga de sólidos, variando a vazão de gás de aeração. Os dados experimentais obtidos foram comparados com a Equação (2.9), proposta por Geldart e Jones (1991). Devido à discordância nos resultados, quando o particulado não era areia, os autores propuseram a correlação (2.13) que inclui a massa específica do leito (ρ_L) como parâmetro:

$$\frac{\Delta P_v}{L} = 0,0498 G_s^{0,203} \rho_L^{0,961} d_v^{-0,63} \bar{d}_p^{-0,269} \quad (S.I.) \quad (2.13)$$

Dentre outros trabalhos sobre quais parâmetros influenciam a descarga de sólidos particulados através de uma válvula L podemos citar: Mori *et al.* (1990), que avaliaram a influência da porosidade na seção vertical da válvula; da Silva *et al.* (1994), que verificaram a relação direta da descarga com a queda de pressão e Daous e Al-Zahrani (1998), que

correlacionaram os parâmetros geométricos da válvula e as características da partícula com a queda de pressão através da válvula L.

As válvulas não mecânicas do tipo V são muito utilizadas em reatores compactos para promoverem o escoamento dos sólidos entre compartimentos adjacentes. A principal característica de operação de uma válvula V em baixas descargas de sólidos particulados é um regime intermitente, produzido por uma operação cíclica que está diretamente relacionada ao nível de sólidos na coluna de entrada de válvula, como observado por Leung, Chong e Lottes (1987).

Li e Kwauk (1991) estudaram a influência das características geométricas de uma válvula V sobre suas condições de operação. A variação do ângulo e da altura da seção de saída dos sólidos exercia influência sobre a descarga de material deixando a válvula, sendo recomendado não ultrapassar um ângulo de 20° com a vertical em razão do surgimento de regiões de sólidos estagnados. A queda de pressão aumentava com o aumento da altura da seção de saída, produzindo um escoamento mais estável dos sólidos. Foi proposta uma correlação para estimar a queda de pressão através da válvula V, baseada na equação de Ergun:

$$-\Delta P_v = 150 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \frac{\mu_g r_b (U_{gb} - U_{pb})}{(\phi d_p)^2 \tan \alpha} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\tan \alpha}{r_b} h} \right) + 1,75 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \frac{\rho_g r_b (U_{gb} - U_{pb})^2}{3\phi d_p \tan \alpha} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan \alpha}{r_b} h \right)} \right) \quad (2.14)$$

onde

- h altura da seção de saída;
- r_b raio da parte inferior da seção de saída;
- U_{gb} velocidade do gás na parte inferior da seção de saída;
- U_{pb} velocidade da partícula na parte inferior da seção de saída;
- α metade do ângulo da seção de saída;

Li *et al.* (1997) estudaram o comportamento do escoamento gás-sólido em um conjunto coluna de retorno e válvula V. Verificaram que o gás de aeração injetado na válvula dividia-se em duas porções, uma que escoava verticalmente pela coluna de retorno e outra que aerava a válvula, sendo a descarga de sólidos através da válvula V dependente da quantidade de gás que escoava pela coluna de retorno. A queda de pressão foi proposta a partir das equações de conservação de massa e de movimento, sendo apresentada a Equação (2.15) válida para o regime permanente de operação e condições onde o atrito gás-parede pode ser negligenciado.

$$\frac{-\Delta P_v}{(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_g)g\Delta H} \approx \frac{3}{4} \frac{C_d}{Ar} |Re_p|(Re_p) \quad (2.15)$$

onde

Ar n° de Arquimedes;

Re_p n° de Reynolds da partícula;

Recentemente a fluidodinâmica de um conjunto envolvendo uma válvula V e uma coluna, entre dois leitos fluidizados, foi analisada por Bhattacharya, Sathiyamoorthy, Govardhana Rao e Mahajan (1998). Neste estudo observaram que o controle da circulação de sólidos era mais eficiente quando o leito a montante operava próximo à condição de mínima fluidização e quando a seção de abertura da válvula era pequena o bastante para produzir uma elevada queda de pressão. Observaram também que a influência do tamanho da partícula sobre a descarga de sólidos através da válvula era dependente da concentração de sólidos na válvula V.

A descarga de sólidos particulados através de orifícios também tem sido amplamente estudada e a influência de diversos fatores como diâmetro e massa específica da partícula ou diâmetro e forma do orifício foram relatados na literatura.

Vários pesquisadores, tais como Massimila, Betta e Rocca (1961), Jones e Davidson (1965) e Burkett *et al.* (1971), mostraram por analogia ao líquido escoando por um orifício em um tanque, que a vazão de sólidos particulados fluidizados (\dot{Q}_s) deixando um leito é :

$$\dot{Q}_s = C_d A_o \sqrt{2gH} \quad (2.16)$$

Por outro lado, a maioria dos estudos de descarga de sólidos particulados a partir de um leito fixo demonstra que não há dependência da descarga com a altura do leito. Essa independência foi verificada por Beverloo, Leniger e van de Velde (1961), que também demonstraram a mesma característica em relação ao diâmetro do leito. A influência do diâmetro da partícula era pequena, podendo ser desprezada, para razões d_o/\bar{d}_p maiores que 20. A descarga de sólidos decresceu com a variação da forma do orifício, conforme a ordem, circular, quadrada, retangular e triangular. Embora a forma tenha influenciado a descarga de sólidos, para os oito tipos de materiais particulados testados, foi observada uma relação linear entre a descarga e a área do orifício, como apresentada na Figura 2.7.

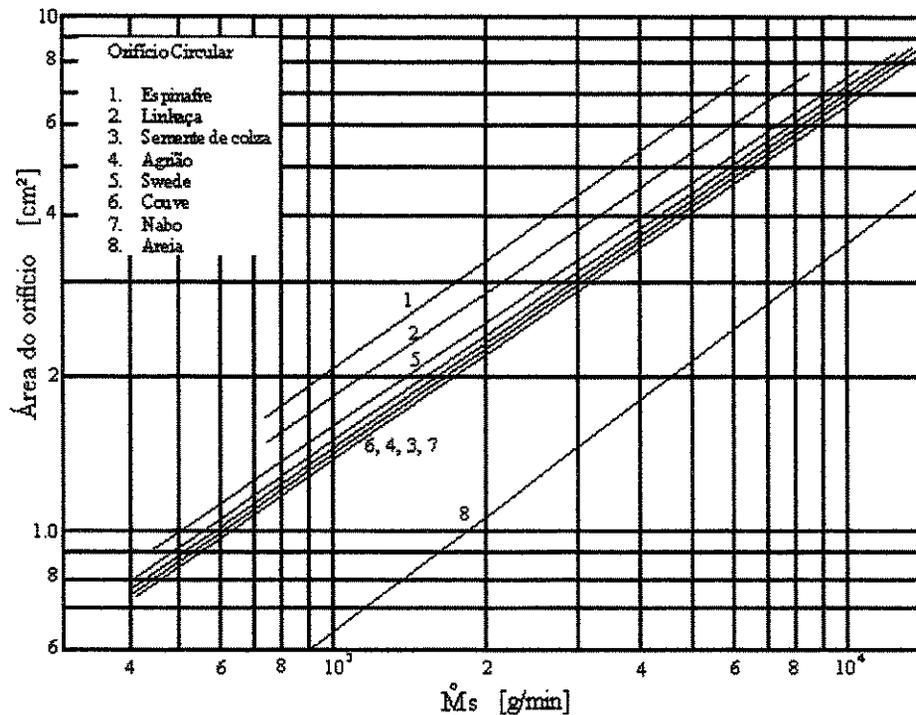


Figura 2.7 – Descarga de sólidos em função da área (Beverloo, 1961).

Beverloo, Leniger e van de Velde, partindo de uma análise dimensional em que a descarga de sólidos particulados seria proporcional à $\rho_L g^{1/2} d_o^{5/2}$ propuseram a correlação:

$$\dot{M}_s = 35\rho_L\sqrt{g}(d_o - k\bar{d}_p)^{5/2} \quad (2.17)$$

onde k variou de 1,3 para semente de agrião a 2,9 para areia.

De Jong (1969) caracterizou três regiões distintas de escoamento de sólidos deixando um leito fluidizado através de um orifício: região operando em regime de leito movente, região acima do orifício e região no interior do orifício. Na região interna do orifício diversos fatores influenciaram a descarga de sólidos, como colisões entre as partículas, colisões das partículas com a parede do orifício e interações do gás com o meio e com as partículas.

Na maioria das aplicações o diâmetro do orifício é muito maior do que seu comprimento, assim a influência das colisões partículas-parede do orifício pode ser desprezada. O autor comentou que a interação gás-partículas pode ser negligenciada quando o escoamento é por gravidade, em razão de não haver diferença de velocidade entre as fases. A partir dessas considerações, de Jong determinou, baseado na equação de Bernoulli, um coeficiente de descarga de 0,53, correlacionando a descarga de sólidos com a densidade do leito em mínima fluidização, o diâmetro efetivo do orifício e a queda de pressão através do orifício, como mostra a Equação (2.18):

$$\dot{M}_s = C_d^2 2\rho_{L, mf} A_{ef} \Delta P_o \quad (2.18)$$

onde

$\rho_{L, mf}$ massa específica do leito em condição de mínima fluidização;

$$A_{ef} \quad \text{área efetiva do orifício, } A_{ef} = \frac{1}{4} \pi (d_o - kdp). \quad (2.18a)$$

A descarga de particulados através de um orifício pode ser alterada de duas maneiras: através de injeção de gás e pelo acoplamento de um tubo na saída do orifício. Ferrari e Bell (1998) estudaram o efeito da injeção de gás na parte inferior de um silo sobre a descarga de sólidos deixando o silo, para particulados dos grupos A e B da classificação de Geldart e para

sólidos semicoesivos. Observaram que mesmo em vazões moderadas de gás, como abaixo de mínima fluidização, houve aumento na descarga dos sólidos, atribuído à ação do gás sobre as forças interpartículas, como as forças coesivas.

O acoplamento de um tubo ao orifício de um leito fluidizado também promove o aumento da descarga de sólidos deixando o leito fluidizado. Esta montagem é utilizada para promover e controlar a descarga de sólidos entre um silo e um leito fluidizado ou entre dois leitos fluidizados.

Bulsara, Zenz e Eckert (1964), estudaram a influência do acoplamento de um tubo vertical ao orifício de saída de um silo sobre a descarga de uma mistura de areia e cinzas. Seus resultados mostraram que descargas maiores foram obtidas para a configuração contendo o tubo conectado ao orifício.

Esse aumento da descarga de sólidos particulados através do conjunto orifício/tubo pode ser explicado pelas observações de de Jong (1969), que considerou a existência de duas correntes de gás, quando este é injetado pela base de um leito. Uma escoia através do orifício e a outra escoia ascendente pelo leito. Quando maior o leito, mais gás escoia através do orifício. Assim considerou que o aumento da descarga de sólidos era função do aumento da aceleração das partículas, devido à quantidade de gás que escoia pelo orifício/tubo.

Chen, Walawender e Fan (1980) estudaram a queda de pressão através de um tubo inclinado interligando um leito fixo a um leito fluidizado. Verificaram que a queda de pressão através do tubo foi relacionada à variação da pressão na saída do tubo, sendo essa uma função da altura do leito fluidizado. A pressão a montante do tubo era pré-fixada enquanto a pressão na saída era determinada como segue:

$$P_{\text{saída}} = \int_{h_s}^H \rho_L g dH + P_f \quad (2.19)$$

onde

P_f pressão na câmara de expansão acima do leito fluidizado.

h_s posição da saída do tubo em relação à placa distribuidora

Considerando a hipótese de que a densidade do leito não varia axialmente, e que a queda de pressão no leito fluidizado é devida apenas ao peso do material particulado, chegaram a:

$$\rho_L A_L H = \rho_{L,mf} A_L H_{mf} \quad (2.20)$$

substituindo a Equação (2.20) e integrando, propuseram a Equação (2.21):

$$P_{saída} = \left(\rho_{L,mf} g H_{mf} \frac{H - h_s}{H} \right) + P_f \quad (2.21)$$

Geldart e Haesebrouck (1983) estudaram a descarga de sólidos deixando um leito fluidizado através de três configurações: orifício, orifício/tubo vertical e orifício/tubo inclinado. Segundo os autores a descarga de partículas finas a partir de um orifício pode ser expressa por:

$$\dot{M}_s = C_d \rho_{L,mf} \frac{\pi}{4} (d_o - k\bar{d}_p)^2 \sqrt{2gH} \quad (2.22)$$

Porém, a descarga de partículas granulares calculada a partir da Equação (2.22) diverge muito da obtida experimentalmente em razão da dependência da altura do leito e do diâmetro do tubo. Na configuração orifício/tubo inclinado observaram um aumento na descarga de sólidos granulares entre 10 a 20% quando comparado com a configuração orifício/tubo vertical, particularmente para grandes alturas do leito. A justificativa desse aumento, segundo os autores, foi devido a uma possível região sub-fluidizada, na parede onde o tudo foi acoplado, menor que na configuração orifício/tubo vertical.

A descarga de sólidos através de tubos inclinados foi amplamente estudada por Sarkar *et al.* (1991 a, b, c) em sistemas operando em regimes de leito fixo e fluidizado. Nesses estudos foram propostas correlações em que parâmetros como o diâmetro (d_o), comprimento (L_t) e inclinação (θ) do tubo, além das propriedades da partícula, foram considerados. A correlação (2.23) foi

obtida para um conjunto experimental operando com leito fluidizado e pode, segundo os autores, ser utilizada para prever a descarga de sólidos através de orifícios, considerando-se θ_F e L_F igual a 1.

$$\dot{M}_s = 0,56\rho_{L,mf} \frac{\pi}{4} \left(d_o - \frac{2,5\bar{d}_p}{\phi} \right)^2 \sqrt{2gH} A_F L_F \theta_F \quad (2.23)$$

Os fatores A_F , θ_F e L_F incluem os efeitos do formato do orifício de entrada, da inclinação e do comprimento do tubo conectado ao orifício de saída de sólidos, respectivamente, sendo:

$$A_F = \sqrt{A_e / A_t} \quad (2.24)$$

onde

A_e área de entrada,

$$\theta_F = \frac{(\text{sen } \theta + \cos \theta r)}{(1 + \cos \theta r)} \quad (2.25)$$

onde

θ_r ângulo de repouso

$$L_F = (1 + L_t/d_o)^{-0,11} \quad (2.26)$$

Na literatura também podemos encontrar outras geometrias de equipamentos utilizados para promover a alimentação de partículas sólidas baseados nos princípios de operação das válvulas não mecânicas. Pécora, Goldstein Jr. Lombardi e Pagliuso (1994) desenvolveram um alimentador pneumático para o controle da descarga de sólidos a partir de um silo. O controle da descarga era efetuado através da quantidade de ar primário injetado para a destruição do cone de repouso das partículas depositadas sobre a uma placa distribuidora localizada próxima à saída de sólidos do

silo. Uma segunda injeção de ar assegurava o transporte das partículas para a fora do alimentador. Os particulados utilizados englobaram todos os grupos da classificação de Geldart. Verificaram que a vazão requerida de ar primário tinha dependência direta com o diâmetro da partícula.

Pugsley, Milne e Berruti (1996) propuseram um alimentador não mecânico para uso em substituição as válvulas não mecânicas. Esse alimentador é basicamente um leito anular acoplado à seção inferior da coluna principal de um LFC. Os sólidos eram retornados à coluna principal através da injeção de ar no leito anular. Os autores relataram elevados fluxos de sólidos, que foram justificados em razão de alta queda de pressão proporcionada pelo leito anular.

Davies, Dawson e Hartley (1990) estudaram o desempenho de venturis, utilizados como alimentadores para sólidos particulados. Nesse estudo apresentaram uma classificação dos venturis de acordo com o princípio de projeto. Foi observado que a descarga de sólidos decresceu com o aumento da contra pressão na linha de transporte para os modelos testados.

A revisão da literatura mostra que existem vários tipos de válvulas de alimentação não mecânicas e que o estudo experimental desses dispositivos é fundamental para o estabelecimento das variáveis que influenciam seus desempenhos.

2.2.2 – Válvulas mecânicas

As válvulas mecânicas são utilizadas principalmente na saída inferior de leitos de partículas sólidas que operam em regime de leito fluidizado, leito deslizante ou leito fixo. A utilização de válvulas mecânicas em sistema gás-sólido é normalmente adotada para condições de operação normais, isto é, temperaturas e pressões ambientes. As válvulas mecânicas mais aplicadas para sólidos particulados são as de palheta e as do tipo disco, como borboleta e portinhola, além da rosca transportadora. De acordo com Spivakovsky e Dyachkov (1983), é difícil apresentar uma classificação geral dos equipamentos ou mecanismos para alimentação de particulados, em razão das diversas formas e aplicações possíveis.

As válvulas tipo disco, são recomendadas para sólidos em regime aerado, enquanto as do

tipo gaveta podem operar também em regime de leito deslizante. As válvulas cônicas são usadas para controlar o escoamento de sólidos deixando um leito fluidizado ou um leito deslizante. Devido à forma cônica de seus internos, essas válvulas mantêm suas características de regulagem mesmo depois de considerável desgaste interno. Na Figura 2.8 estão representadas aplicações desses equipamentos em processos como: recobrimento e crescimento de partículas (a), alimentação para linha de transporte (b) e armazenagem de sólidos (c).

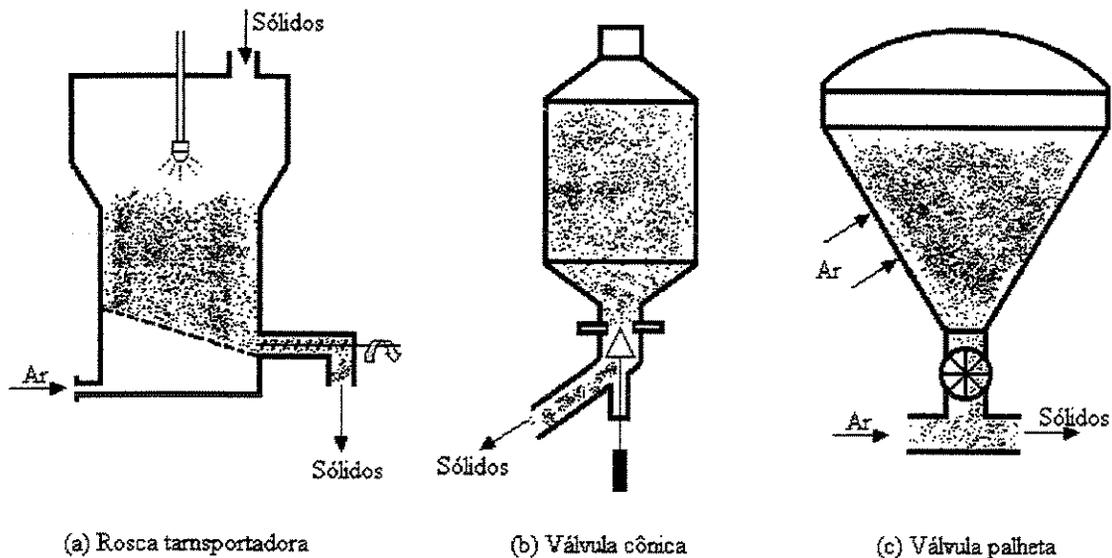


Figura 2.8 – Aplicações típicas de válvulas mecânicas

Sankar e Smith (1986) utilizaram uma válvula cônica para alimentar particulados em uma linha de transporte pneumático. A escolha de tal equipamento, segundo os pesquisadores, foi em razão das diversas vantagens sobre outros sistemas de alimentação, como a rosca transportadora, colunas de retorno fluidizadas ou venturis, que sofrem com flutuações da descarga de sólidos e tem controle limitado sobre esta descarga. As seguintes vantagens foram citadas:

- a) Seleção de qualquer descarga pelo simples ajuste da abertura da válvula;
- b) Fixando-se a abertura, a descarga de sólidos permanecia constante;
- c) Operação simples;
- d) Precisão no ajuste requerido, evitando a necessidade de monitoramento durante o processo.

Descreveram a ocorrência de um escoamento intermitente quando o nível dos sólidos no leito era alto e quando a descarga era de partículas do grupo A da classificação de Geldart, em razão da necessidade de maior tempo de equalização da pressão no orifício.

As descargas de materiais particulados a partir de um silo são frequentemente controladas com o uso de válvulas rotativas, em que suas dimensões geométricas, velocidade de rotação e as propriedades do particulado são as principais características a serem consideradas para análise de seu desempenho.

Baseados nessas considerações Scheibe, Höhne e Husemann (1997) apresentaram uma correlação para prever a descarga de sólidos (\dot{M}_s) a partir de uma válvula palheta, controlando-se a rotação do eixo da válvula (N).

$$\dot{M}_s = \rho_L (V_s n_p) N \quad (2.27)$$

onde

V_s volume de sólidos por pá;

n_p número de pás.

O aumento da rotação aumenta o desvio entre a descarga prevista e a realmente obtida, devido à influência da força centrífuga, que age em sentido contrário ao do sólido entrando nas pás do rotor. Segundo Michon (1996), quando a rotação ultrapassa 30 rpm o decréscimo da descarga de sólidos é muito mais rápido.

Uma curva típica de alimentação de sólidos particulados através de uma válvula rotativa é apresentada na Figura 2.9.

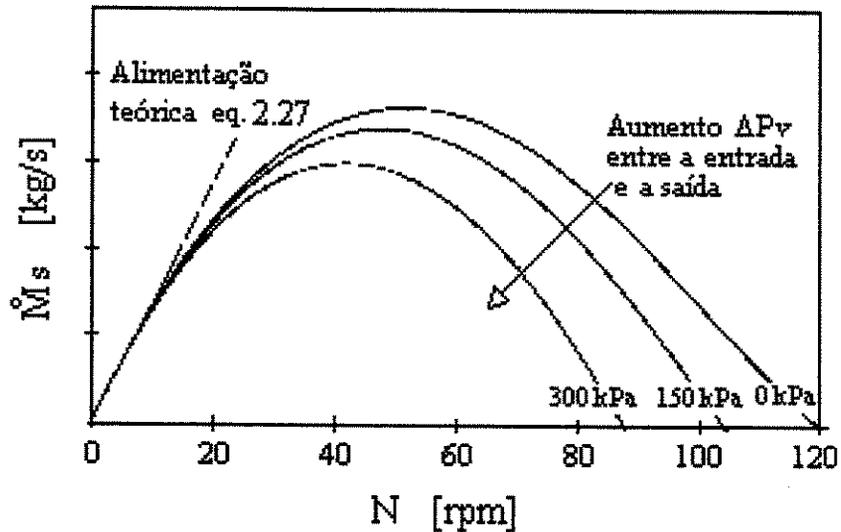


Figura 2.9 Curva típica de uma válvula rotativa (Scheibe, 1997).

A capacidade de vedação das válvulas mecânicas é talvez sua principal característica e vantagem sobre as válvulas não mecânicas, porém, devida atenção deve ser dada quando estas válvulas estiverem operando com particulados abrasivos. A abrasividade dos sólidos pode desgastar a sede metálica de uma válvula borboleta ou o conjunto sede/cone de uma válvula cônica reduzindo a capacidade de vedação desses equipamentos.

Michon (1996) estudou o vazamento de ar que era injetado em válvula rotativa, identificando três correntes de escape:

- a) Ar retornando ao silo;
- b) Ar escoando através dos espaços entre as pás e o corpo da válvula;
- c) Ar escoando pelos anéis de vedação do eixo do rotor.

Segundo o autor, esses vazamentos diminuíam a descarga de sólidos, diminuíam a eficiência da mistura gás-partícula e aumentavam os custos da produção.

A fabricante de válvulas Warex Valve GmbH (1998), apresentou uma válvula borboleta com um sistema de contato pneumático da sede com o disco, visando garantir a vedação em

condições de operação adversas. Quando a válvula era fechada, a sede de elastômero era pressurizada contra o disco, que mesmo com desgastes irregulares tinha toda sua circunferência em contato com o elastômero.

Li, Hong e Wang (1999) compararam o desempenho de uma válvula borboleta com uma válvula não mecânica do tipo V. Observaram que para particulados coesivos a utilização de uma válvula borboleta não era recomendada, pois, em algumas circunstâncias havia um travamento da válvula devido aos aglomerados formados.

Wypych (1999) apresentou uma revisão detalhada sobre a utilização de diversos modelos de válvulas mecânicas para controlar a descarga de sólidos a partir de silos aerados. A utilização de válvulas que possibilitam, na abertura, uma área livre total de passagem ao escoamento é indicada para a redução no desgaste dos componentes. As válvulas rotativa e borboleta produziram um escoamento assimétrico no interior do silo devido ao escoamento preferencial na saída da válvula, que podia acarretar arcos ou regiões de sólidos estagnados dentro dos silos. Para reduzir custos de manutenção foi recomendado que a válvula borboleta fosse usada apenas como controladora e não como válvula de bloqueio.

As roscas transportadoras são equipamentos de utilização comum na descarga de particulados armazenados em silos, em regime de leito fixo. Segundo Manton (1994) o projeto de roscas transportadoras geralmente tem uma abordagem empírica, havendo na literatura recomendações para auxiliar no dimensionamento do projeto, em função da capacidade de descarga e da distância de transporte dos particulados. Estas duas características de operação são as principais limitações mecânicas de uma rosca transportadora.

A eficiência volumétrica é um dos principais parâmetros a serem considerados no projeto ou na seleção de uma rosca transportadora. Yu e Arnold (1996) exprimiram a eficiência volumétrica (η_v) como o volume de material efetivamente transportado (V_s) em uma volta do eixo, dividido pelo volume teórico (V_t) existente em um passo de rosca (P):

$$\eta_v = \frac{V_s}{\pi P(R_p^2 - R_e^2)} \quad (2.28)$$

onde

P passo da rosca

R_p raio da pá

R_e raio do eixo

A eficiência volumétrica foi também relacionada à porcentagem de enchimento e ao efeito da rotação. Em geral, as aplicações de descarga de sólidos a partir de silo são em regime de leito fixo e as roscas operam em baixas rotações, possibilitando-as operar com enchimento total, ou seja, os efeitos de rotação são dominantes e dependem da geometria da rosca, Figura 2.10.

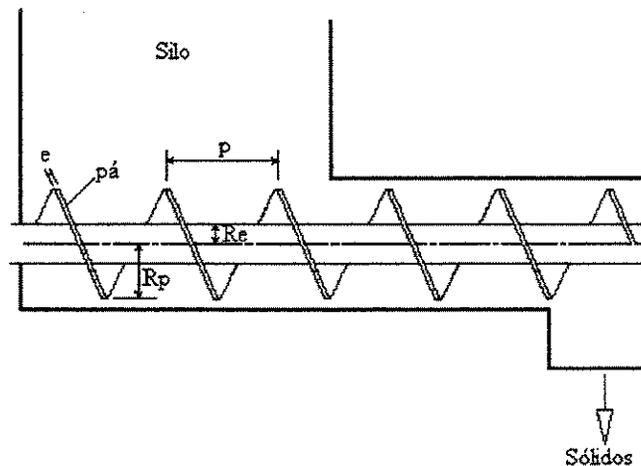


Figura 2.10 – Características geométricas de uma rosca transportadora

A eficiência volumétrica será sempre menor que a unidade. Roberts (1996) apresentou as razões pelas quais $V < V_t$:

- A velocidade axial do sólido será menor que a velocidade ideal ou ótima devido ao movimento de rotação da rosca;
- Ocorre algum deslizamento no espaço livre entre a rosca e o casco;
- O enchimento da rosca decresce com o aumento da velocidade de rotação;
- A espessura da pá da rosca reduz o enchimento.

Além da eficiência volumétrica há outro aspecto relevante no dimensionamento de uma rosca transportadora, a interface silo/rosca. Grande parte dos problemas durante a alimentação por meio de roscas transportadoras ocorre na interface silo-rosca. Autores como Haaker *et al.* (1994) e Yu e Arnold (1996) dirigiram seus esforços a este estudo. A rosca deve retirar os particulados por igual ao longo do silo, para isso, Roberts (1996) estabelece uma variação linear de três parâmetros: diâmetro externo, diâmetro do eixo e passo da rosca.

A revisão da literatura apresentada mostrou-nos a importância dos sistemas de alimentação de sólidos particulados e cuidados devem ser tomados na sua escolha e especificação. A operação de uma válvula está relacionada à suas características construtivas, às condições de processo e ao sólido particulado utilizado. A queda de pressão através de uma válvula é um dos parâmetros mais importantes na sua seleção. A capacidade da válvula em promover e controlar a descarga de sólidos e que parâmetros influenciam nesse controle devem ser considerados. A escolha deve ser feita conforme as necessidades do processo. Muitos processos dependem da eficiência com que os sólidos são alimentados ou descarregados para que o sucesso da atividade seja assegurado.

Capítulo 3

Metodologia e Descrição do Sistema Experimental

A metodologia do trabalho, as técnicas empregadas, os equipamentos aplicados à determinação das propriedades dos sólidos particulados, o detalhamento do conjunto experimental, e a análise de incerteza serão apresentados neste capítulo. Serão também apresentados os conceitos e o método do planejamento experimental utilizado.

A primeira etapa deste trabalho foi caracterizar os sólidos particulados utilizados no escoamento através da válvula cônica. As propriedades da partícula sólida medidas experimentalmente foram a massa específica e diâmetro médio da partícula.

O planejamento fatorial foi a segunda etapa do presente trabalho. Saber quais fatores (variáveis de entrada) afetam a resposta (variável de saída) foi a primeira tarefa executada. O levantamento bibliográfico foi a ferramenta utilizada para determinar os fatores e respostas de interesse.

Os fatores sobre os quais o controle foi mantido foram: razão área de abertura da válvula/área do tubo de entrada (A_v/A_t), queda de pressão entre as extremidades da válvula (ΔP_v), diâmetro médio do sólido particulado (\bar{d}_p) e temperatura do leito fluidizado (T_L). A resposta desejada foi a descarga de sólidos através da válvula (\dot{M}_s).

A terceira e última etapa pôde ser dividida em duas partes: a construção do conjunto experimental e a elaboração do procedimental experimental a ser seguido em cada um dos testes realizados para se obter os resultados através da variação dos fatores.

3.1 – Caracterização das partículas

A importância da caracterização das partículas advém de sua influência sobre vários parâmetros experimentais. Mohsenin (1970) salientou a importância do conhecimento das propriedades do particulado para o projeto de equipamentos ou para o controle de processos. Ainda segundo Mohsenin, o tamanho da partícula afeta significativamente os processos onde são utilizadas.

3.1.1 – Distribuição granulométrica

O sólido particulado utilizado foi areia, em dois diâmetros médios diferentes. A escolha de um material inerte teve como objetivo estudar somente o escoamento das partículas através da válvula, não interessando quaisquer reações químicas em seu interior ou dentro da câmara de combustão. A distribuição granulométrica foi determinada através de ensaios de peneiramento por vibração mecânica utilizando um vibrador de peneiras Produtest e está apresentada no Anexo I. As peneiras da série Tyler utilizadas compreendiam as aberturas de 88 a 590 μm . Inicialmente foram feitos alguns testes objetivando selecionar quais as faixas de aberturas de peneiras seriam apropriadas para o sólido utilizado. O critério de exclusão foi estabelecido em relação à massa que ficava retida na peneira. O tempo de peneiramento foi padronizado em 15 minutos. O diâmetro médio das partículas foi calculado através da equação da Equação (2.6), apresentada anteriormente. Os resultados desse procedimento foram:

- Para a mistura contendo partículas menores: $\bar{d}_p = 185 \mu\text{m}$, e
- Para a mistura contendo partículas maiores: $\bar{d}_p = 285 \mu\text{m}$.

3.1.2 – Massa específica

A massa específica da areia foi obtida através da técnica de picnometria, que consiste no deslocamento de um líquido, de massa específica conhecida, pela adição dos sólidos particulados. O líquido utilizado foi água destilada. Inicialmente as massas do picnômetro com e sem líquido foram determinadas, através de pesagem em uma balança. A seguir foi colocada uma massa conhecida de sólido particulado no picnômetro vazio e então se completou com o líquido. A massa específica do sólido foi determinada sabendo-se que o volume do líquido deslocado pelo sólido é igual ao volume de sólidos adicionados.

O valor determinado foi de 2710 kg/m^3

3.2 – Planejamento fatorial

A maioria das técnicas estatísticas aplicadas atualmente nos estudos experimentais foi desenvolvida no início do século, sempre objetivando obter do estudo proposto o máximo de informações úteis com o mínimo de experimentos possíveis. Neste trabalho foi utilizado o planejamento fatorial em dois níveis, como proposto por Box, Hunter e Hunter (1978), que forneceu o número mínimo de experimentos a serem realizados. A técnica consiste primeiramente em determinar as variáveis de influência (fatores) e as de interesses (respostas) do estudo. Definidas essas variáveis deve-se especificar os níveis, superior e inferior, de cada um dos fatores, daí o nome de planejamento fatorial de dois níveis, o superior e o inferior. Genericamente, havendo dois níveis para cada um dos fatores implica que o número total de experimentos é um fatorial 2^k , onde k é o número de fatores. O passo seguinte é quantificar os efeitos de cada um dos fatores sobre a resposta e posteriormente testes estatísticos são aplicados a fim de verificar a confiabilidade dos resultados obtidos, através da construção de intervalos de confiança.

A revisão da literatura é fundamental na determinação dos fatores e das respostas. Neste estudo os fatores analisados foram:

- a) Razão entre a área de abertura da válvula (A_o) e a área do tubo de entrada (A_t);
- b) Queda de pressão entre as extremidades da válvula (ΔP_v);
- c) Diâmetro médio do sólido particulado (\bar{d}_p).
- d) Temperatura do leito fluidizado (T_L);

A resposta de interesse foi a descarga de sólidos particulados através da válvula, (\dot{M}_s).

Seguindo o exposto no parágrafo inicial e com a quantidade de fatores definida obteve-se o número de 16 experimentos para a realização do atual trabalho. Os testes foram feitos em duplicata para que uma estimativa do desvio padrão experimental envolvido fosse determinada.

A Tabela 3.1 mostra os valores dos níveis estabelecidos para os fatores. Esses valores foram definidos em função das características e limitações do conjunto experimental e do material particulado disponível.

Tabela 3.1 – Níveis dos fatores

Fator	Nível inferior	Nível superior
1 – A_o/A_t	0,1	0,28
2 – ΔP_v [kPa]	1,372	2,745
3 – \bar{d}_p [μm]	185	285
4 – T_L [$^{\circ}\text{C}$]	26	750

Os experimentos foram realizados de tal forma que os níveis dos fatores fossem combinados entre si. A combinação é apresentada na Tabela 3.2, denominada matriz de planejamento, onde os níveis de cada um dos fatores foram substituídos por sinais algébricos, coeficientes de contraste, que correspondem os valores superior (+) e inferior (-). A variável de interesse também esta presente na tabela. A inclusão das colunas de resposta à matriz de planejamento é útil para a análise do cálculo dos efeitos. Barros Neto, Scarminio e Bruns (1995) classificaram os efeitos em principal e efeitos de interação. O cálculo para o efeito principal de

cada um dos fatores e para o efeito das interações entre os fatores é definido como sendo a diferença entre as respostas média nos níveis superior e inferior.

$$E_f = \bar{q}^+ - \bar{q}^- \quad (3.1)$$

onde

\bar{q}^+ Resposta média para o nível superior

\bar{q}^- Resposta média para o nível inferior

Tabela 3.2 - Matriz de planejamento com os coeficientes de contraste

Experimento	Fatores				Resposta
	A_o/A_t (1)	ΔP_v (2)	$\bar{d}p$ (3)	T_L (4)	\dot{M}_s [kg/h]
1	-	-	-	-	
2	+	-	-	-	
3	-	+	-	-	
4	+	+	-	-	
5	-	-	+	-	
6	+	-	+	-	
7	-	+	+	-	
8	+	+	+	-	
9	-	-	-	+	
10	+	-	-	+	
11	-	+	-	+	
12	+	+	-	+	
13	-	-	+	+	
14	+	-	+	+	
15	-	+	+	+	
16	+	+	+	+	

A tabela acima deve ser complementada com as colunas referentes às interações. Essas colunas são obtidas pela multiplicação das colunas que compõem a interação. Tomando o experimento 12 como exemplo, a interação 23 (ΔP_v e $\bar{d}p$) teria o coeficiente de contraste (-). No caso do experimento 3, a interação 134 (A_v/A_t , $\bar{d}p$ e T_L) teria o coeficiente (-).

A última etapa de qualquer planejamento experimental é calcular o desvio experimental envolvido na obtenção da resposta. As equações abaixo, retiradas do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição - ABNT (1998), foram utilizadas para o cálculo do desvio, sendo a média (\bar{q}), a variância ($S_{q_k}^2$), a variância experimental (S_{exp}^2) e o desvio padrão experimental de um efeito (S_{ef}), calculados pelas expressões (3.2) a (3.5) respectivamente.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.2)$$

onde

n número de medidas
 q_k valor experimental
 \bar{q} valor médio

$$S_{q_k}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (3.3)$$

$$S_{exp}^2 = \frac{v_1 S_{q_1}^2 + v_2 S_{q_2}^2 + \dots + v_k S_{q_k}^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_k} \quad (3.4)$$

onde

v número de graus de liberdade ($v = n-1$)

$$S_{ef} = \sqrt{\frac{S_{exp}^2}{\frac{n_{exp}}{2}}} \quad (3.5)$$

onde

n_{exp} número de experimentos

Neste trabalho os efeitos principais e as interações foram calculados através de uma planilha elaborada para uso em aplicativo *Excel* (Anexo II).

3.3 – Sistema Experimental

O sistema experimental utilizado nos testes é esquematizado na Figura 3.1, constituído de basicamente pelos componentes: silo de armazenagem dos sólidos particulados (1), válvula pneumática (2), câmara de combustão operando em leito fluidizado (3), válvula cônica (4), trocador de calor (5), utilizado nos testes a quente, e sopradores (10).

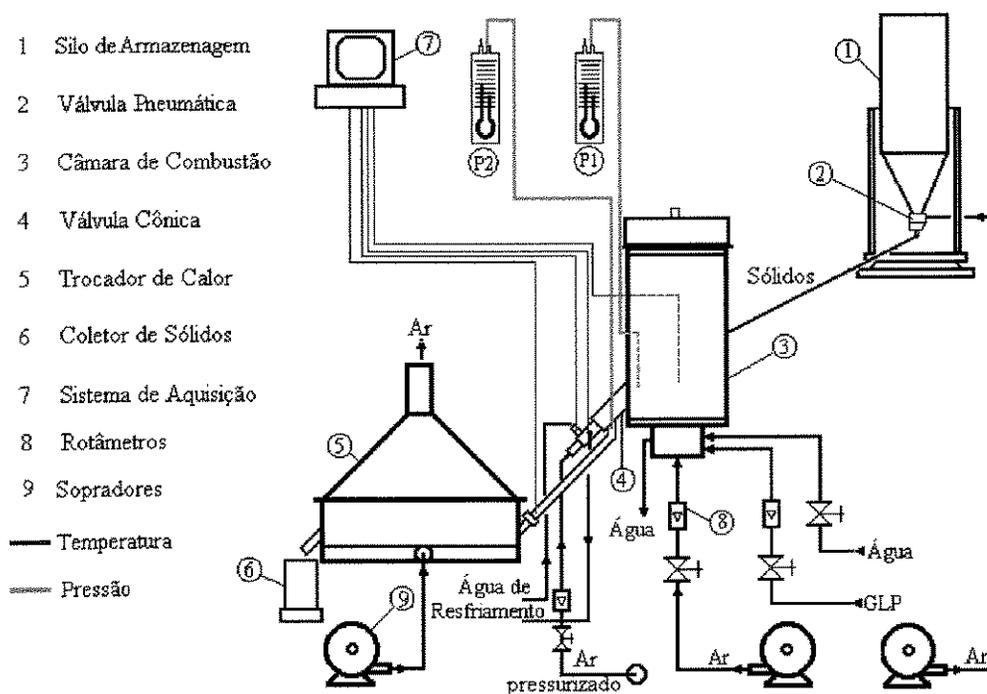


Figura 3.1 – Sistema experimental

A seqüência de operação básica compreendeu as etapas de alimentar a câmara de combustão (3) com material inerte frio através da válvula pneumática (2) conectada ao silo de armazenagem de sólidos (1), controlar a descarga de sólidos aquecidos deixando a câmara de combustão através da válvula cônica (4) e coletar os sólidos diretamente no coletor de sólidos (6) ou em conjunto com o trocador de calor (5). O trocador foi utilizado apenas nos testes com temperatura elevada. O controle da descarga de sólidos deixando a câmara de combustão foi feito através de cronometragem e pesagem, utilizando-se balança eletrônica com precisão de 0,02 kg; enquanto o controle da vazão de água de resfriamento foi feito por meio de proveta e cronômetro. Para o monitoramento das temperaturas empregou-se termopares tipo T e K, via sistema de aquisição de dados. As leituras das pressões foram feitas através de manômetros com tubo em U

Os equipamentos auxiliares utilizados no sistema experimental estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Equipamentos auxiliares e suas características

Equipamento	Modelo	Característica
Ventilador centrífugo	Kepler Weber	1,5 m ³ /s - 1500 mmca
Compressor radial	Ibram – CR 5	2,8 m ³ /min - 2500 mmca
Compressor radial	Ibram – CR 8	6 m ³ /min - 3700 mmca
Rotâmetro para ar	-x-x-	0 – 12 l/s
Rotâmetro para GLP	Gemu	100 – 1200 NI/h
Computador PC	Acer	<i>Pentium</i> 133 MHz
Placa de aquisição de dados	Lynx – CAD – 12/32	32 canais
Condicionador de sinais	Lynx – MCS 1000	Alimentação ± 12 V - Saída · 5V
Balança	Filizola – ID 1500	± 0,02 kg
Cronômetro	Casio	
Termopares	-x-x-	Tipo T e K

A Figura 3.2 mostra uma visão parcial do sistema experimental, envolvendo a câmara de combustão, a válvula cônica e o trocador de calor.



Figura 3.2 – Visão do sistema experimental

3.3.1 – Câmara de combustão

A câmara de combustão utilizada neste trabalho opera em regime de leito fluidizado borbulhante. Sua construção permite o aquecimento dos sólidos particulados e a alimentação desses de forma contínua. A combustão no interior do leito foi através da queima de gás liquefeito de petróleo (GLP) em atmosfera oxidante (10% de excesso de ar). As dimensões são mostradas na Figura 3.3. As características construtivas limitam a câmara de combustão em dois componentes: o leito, ou corpo da câmara, e a câmara de expansão (*plenum*). O leito foi fabricado em cilindros de aço, sendo um em carbono com espessura de 3,2 mm, montado externamente, e outro em aço inox com espessura de 5mm, montado internamente. Entre os cilindros há uma camada de isolante térmico de 0,07 m de espessura e outra de concreto refratário com 0,1 m de

espessura. O diâmetro interno do leito é 0,31 m. O *plenum* foi feito em aço inox e montado na parte inferior do leito, possui diâmetro interno de 0,31 m. O ar foi injetado no leito através de uma placa distribuidora composta de 19 bicos injetores, cada um possuindo 6 orifícios de diâmetro 1,5 mm. Detalhes da construção desse equipamento podem ser encontrados em Parise (2000).

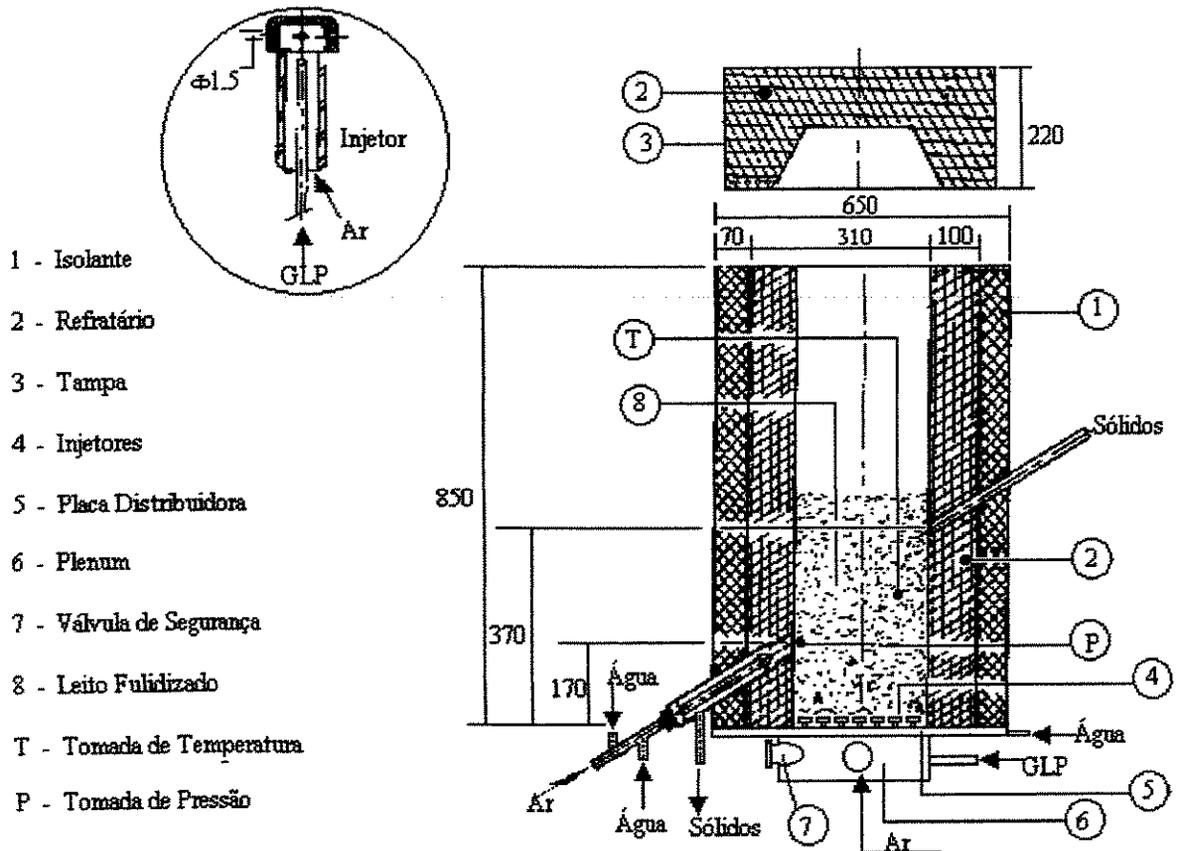


Figura 3.3 – Esquema da câmara de combustão e dos bicos injetores

3.3.2 – Válvula pneumática para alimentação de sólidos particulados

A alimentação dos sólidos particulados na câmara de combustão foi feita através da válvula pneumática. A válvula é do tipo não mecânica e funciona com duas injeções de ar: a primária situada na placa horizontal sob o silo, onde há um conjunto de injetores de ar, e a secundária situada na base da válvula, permitindo o transporte dos sólidos até a câmara de combustão. Esse

alimentador já foi descrito no Capítulo 2 e maiores detalhes de projeto e operação podem ser obtidos em Pécora *et al.* (1994). A Figura 3.4 apresenta o esquema dessa válvula.

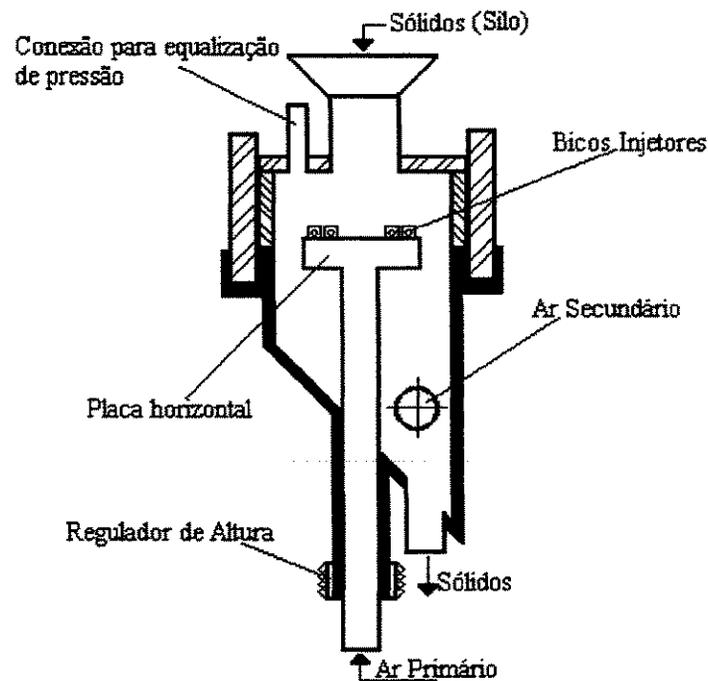


Figura 3.4 – Esquema da válvula pneumática

3.3.3 – Válvula cônica

A válvula cônica é o objeto de estudo deste trabalho. Ela foi idealizada para atender a necessidade de transferir sólidos particulados em temperaturas elevadas entre reatores. A principal consideração no desenvolvimento da válvula foi assegurar o controle efetivo da descarga de sólidos dentro de uma faixa de operação relativamente ampla; controle esse conseguido com aperfeiçoamentos sucessivos no projeto da válvula cônica.

O aperfeiçoamento do projeto foi focado na capacidade da válvula em promover o escoamento estável e contínuo da suspensão gás-partícula, além de garantir a repetibilidade nos valores obtidos das descargas de sólidos. A concentração de esforços nessas características foi em razão das dificuldades encontradas durante a operação da válvula na fase inicial dos estudos.

Para facilitar o entendimento das etapas de evolução do projeto são apresentadas as Figuras 3.5 e 3.6, que representam esquematicamente a válvula original e a segunda versão com as alterações realizadas, respectivamente.

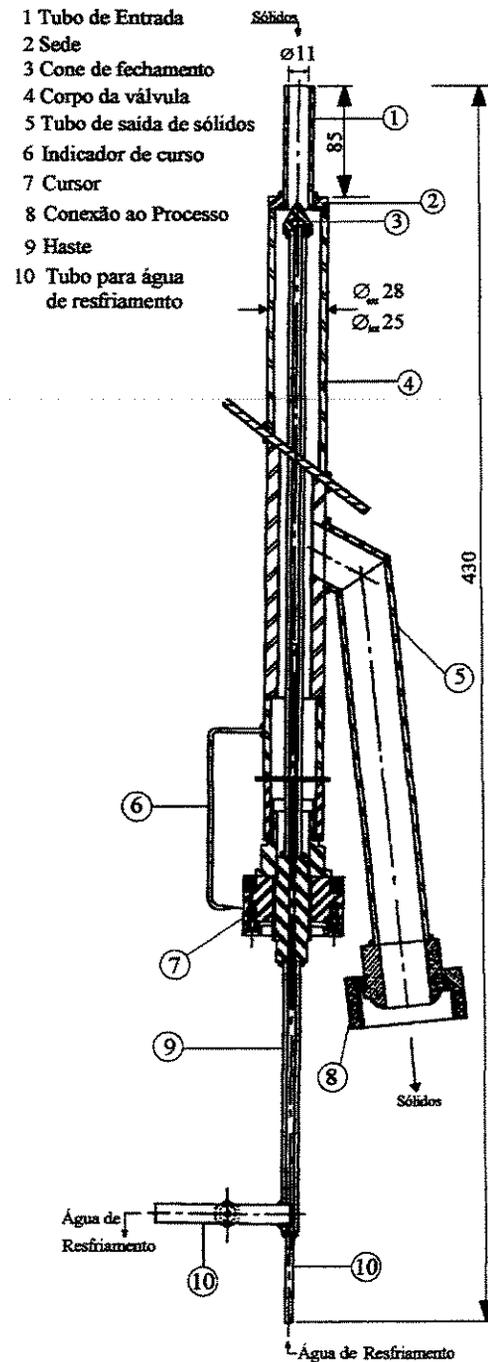


Figura 3.5 – Válvula cônica original, sem alterações no projeto.

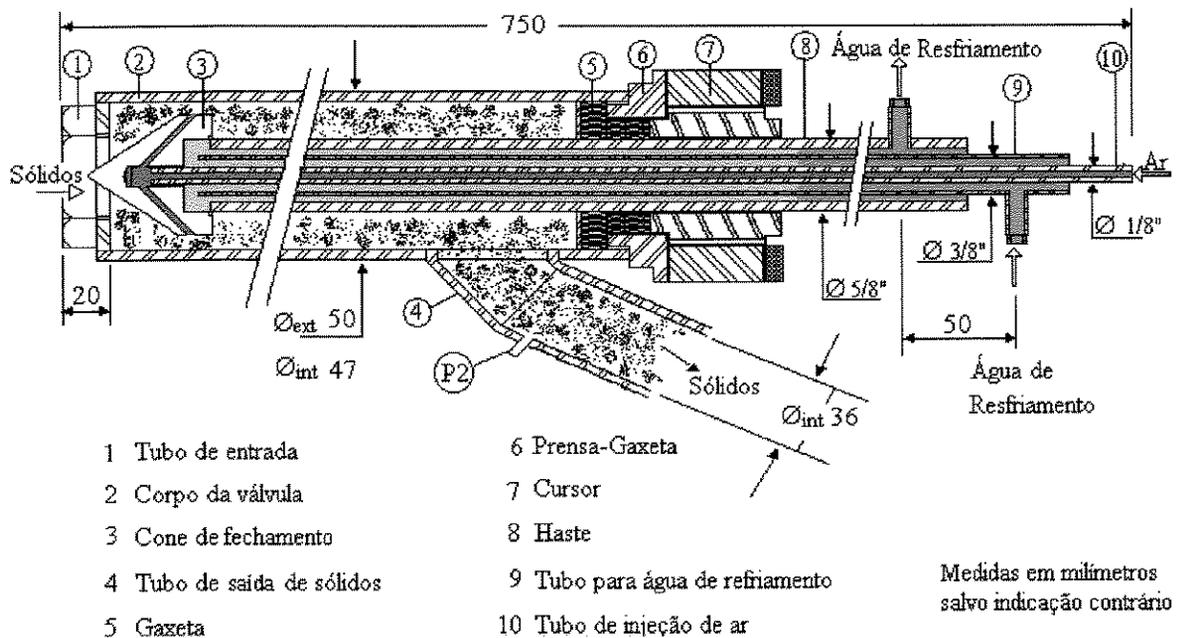


Figura 3.6 – Válvula cônica modificada.

A observação simultânea das figuras mostra que houve duas modificações principais na configuração da válvula: a redução do comprimento do tubo de entrada (1) e a adição de um tubo para injeção de ar (10) na configuração final. Sem essas alterações o controle da descarga de sólidos através da válvula era ineficiente em qualquer abertura de teste. O escoamento da suspensão gás-partícula observado era inconstante, não sendo possível mantê-lo uniforme ao longo do tempo. Durante os testes, em uma mesma abertura, a descarga de sólidos diminuía até cessar por completo. Essa característica de operação impossibilitava a repetibilidade dos valores das descargas e gerava incertezas na confiabilidade da válvula.

As dificuldades descritas acima foram atribuídas principalmente ao comprimento do tubo de entrada. O comprimento desse tubo, entre o primeiro projeto e a válvula com as alterações, variou na ordem de quatro vezes. O comprimento foi considerado longo o bastante para que uma região não fluidizada ocorresse em seu interior, bloqueando a passagem dos sólidos através da válvula.

A adição do tubo para injeção de ar foi uma alteração visando manter a suspensão gás-

partícula fluidizada em toda a extensão do tubo de saída de sólidos (itens 5 e 4 nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente). Dessa maneira, foi assegurado o transporte dos sólidos, sem que houvesse estagnação dos mesmos no tubo.

Além dessas alterações, efetivamente realizadas na válvula, houve uma modificação na extremidade do tubo de saída. A modificação foi a colocação de um anteparo na metade superior do tubo. Essa modificação não influenciou em nenhum aspecto a operabilidade da válvula. A necessidade da modificação surgiu em razão de flutuações observadas no manômetro referente à tomada de pressão P2 (Figura 3.1) no tubo de saída, nas condições de maiores aberturas da válvula (razão A_o/A_t no nível superior). A flutuação da pressão possuía característica cíclica, definida por um aumento inicial, estabilização em um patamar e um pico seguido de queda brusca. A Figura 3.7 representa essa flutuação.

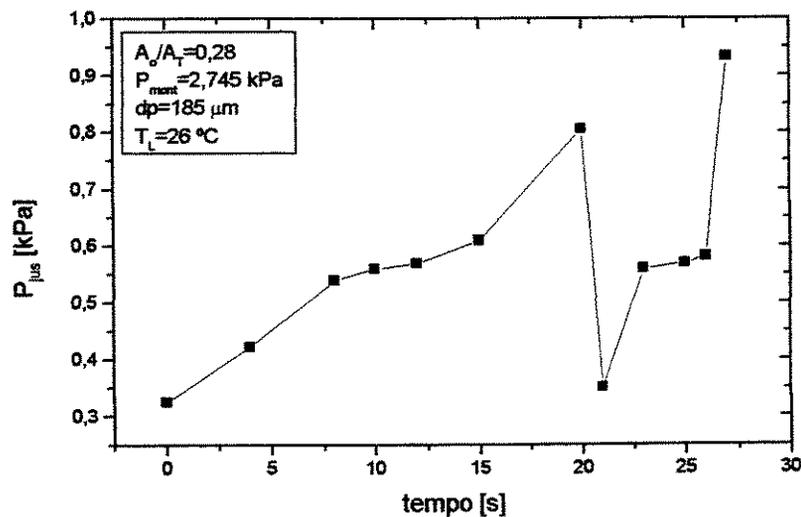


Figura 3.7 - Operação cíclica da válvula em elevadas descargas

Utilizando-se da visualização do escoamento dos sólidos através do tubo de descarga de sólidos tem-se a explicação para o fenômeno da flutuação. De modo geral o escoamento apresentava características de escoamento estratificado, havendo maior concentração de partículas na seção inferior do tubo de descarga. A porção de sólidos estratificada formava ondas que cresciam até que havia a ejeção de uma grande quantidade de sólidos em forma de golfadas. Os picos na tomada de pressão P2 eram observados no momento em que as golfadas deixavam o

tubo de saída da válvula, assim atribui-se os picos à passagem das ondas por essa tomada. Com a colocação do anteparo o escoamento no tubo de saída tornou-se um uniforme e as flutuações diminuíram consideravelmente, como mostrado na Figura 3.8.

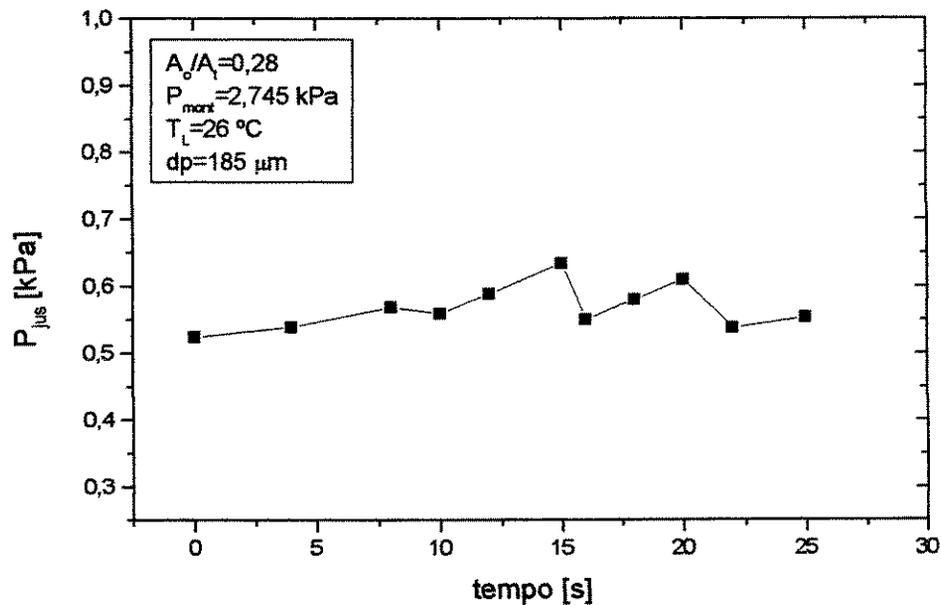


Figura 3.8 – Flutuação da P2 com anteparo

As alterações sugeridas e implementadas tiveram o efeito esperado, superando as dificuldades impostas ao escoamento do particulado, quando o primeiro modelo de válvula estava em testes. Assim, a válvula que efetivamente foi utilizada durante a coleta de dados proporcionou um escoamento constante dos sólidos; possibilitando, por exemplo, a seleção de uma descarga conhecida em função da abertura da válvula.

Essa possibilidade de pré selecionar uma descarga em função da abertura da válvula é a principal característica da efetividade no controle da descarga de sólidos. O mecanismo de controle (ver Figura 3.6) da descarga de sólidos através de válvula é obtido em função do movimento progressivo ou regressivo do conjunto cone de fechamento (3) e haste (8) em relação ao orifício sede do tubo de entrada (1), através do cursor (7).

A válvula utilizada no estudo é apresentada na Figura 3.9. Nessa figura alguns detalhes podem ser observados, como as tomadas de pressão, à direita, ou as conexões para a água de resfriamento e para o ar de injeção, à esquerda.

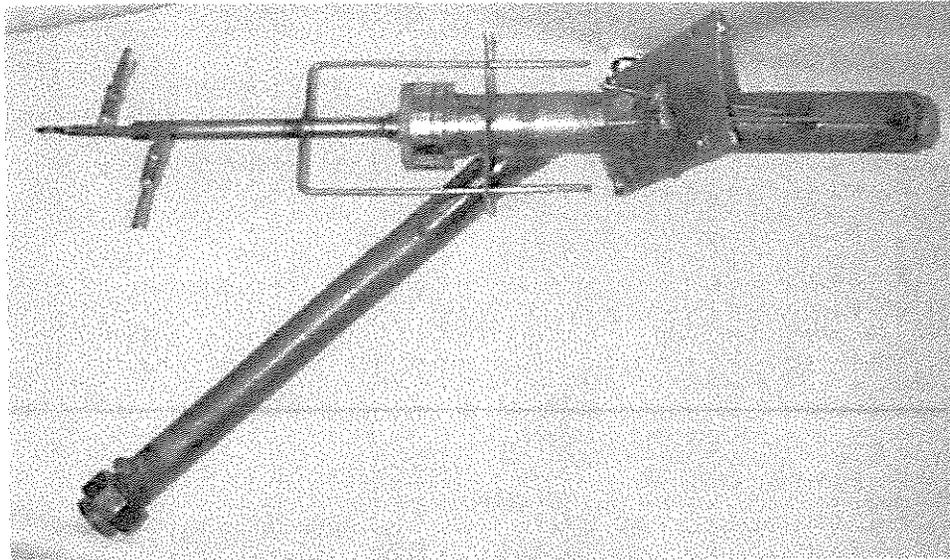


Figura 3.9 - Válvula Cônica

Na especificação dos materiais para a construção da válvula foi considerada principalmente a temperatura de operação, que atingiu 850 °C. O material especificado para toda a válvula foi aço inox ASTM A 276 T 310, exceto os tubos de cobre utilizados para a condução de água e para a injeção de ar.

No dimensionamento da válvula dois aspectos foram considerados: a área anular existente entre o diâmetro da seção reta do cone (3) e o diâmetro interno do corpo da válvula (2) e a relação diâmetro dos tubos de entrada (1) e o tubo de saída de sólidos (4)

Para o primeiro caso foi tomado o cuidado de dimensionar a área anular maior que a área de abertura para o maior tubo de entrada, evitando que essa área fosse um fator restritivo à descarga de sólidos. No segundo caso, o cuidado foi em utilizar um tubo de saída de sólidos de diâmetro maior que o maior diâmetro do tubo de entrada utilizado nos testes, assegurando que o

primeiro não fosse um gargalo no escoamento dos sólidos através da válvula.

A área de abertura da válvula foi calculada segundo norma ISA 75.01, a partir da área de um triângulo conforme a Figura 3.10, e representada pela Equação (3.6). Nessa figura, em detalhe, estão representadas as características construtivas do cone, como os canais de saída do ar injetado.

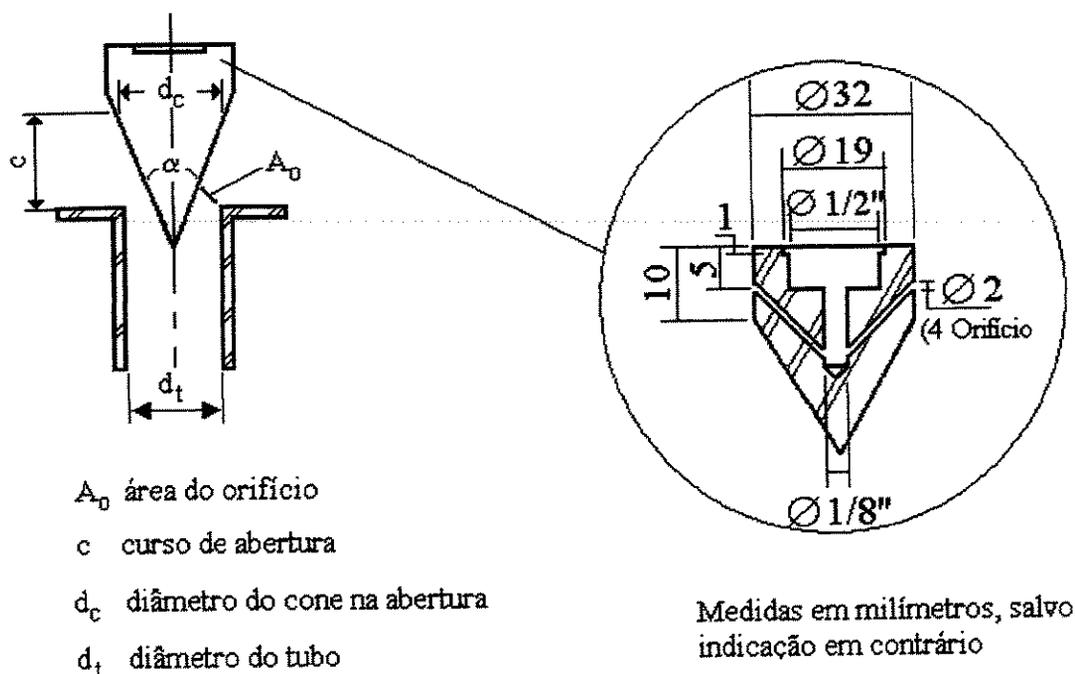


Figura 3.10 – Representação da área do orifício. (Baumann, 1991).

$$A_o = \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)c(d_o - d_c)0,5\pi \quad (3.6)$$

Como descrito anteriormente, as características construtivas dos internos da válvula são os pontos importantes do seu bom funcionamento. No interior da haste que suporta o cone de fechamento foram introduzidos dois tubos de cobre com funções diferentes. O primeiro tubo conduz água até o cone para que se possa resfriá-lo, evitando dessa maneira a dilatação e consequente deformação. O segundo tubo foi inserido para injeção de ar, assegurando que os

sólidos particulados após passarem através do orifício sede do tubo de entrada permanecessem fluidizados.

A vazão de ar injetado foi a mesma em todos os experimentos, 35 NI/s, medida com rotâmetro e mantida à pressão de 3 bar. A quantidade de ar injetado era limitada pelo diâmetro dos orifícios no cone de fechamento; contudo essa quantidade estava próxima à velocidade de transporte pneumático em tubo horizontal (velocidade de saltação) para ambos os diâmetros de sólidos. Dessa maneira procurou-se evitar variações na velocidade do ar injetado e conseqüentemente a influência desse parâmetro na descarga de sólidos através da válvula.

Além das considerações de projeto para uma boa operação da válvula cônica, cuidado especial foi tomado em sua montagem na câmara de combustão. Manteve-se o tubo de entrada e o cone de fechamento o mais próximo possível do leito fluidizado, garantindo que as partículas estivessem fluidizadas no momento de abertura da válvula.

3.3.4 – Instrumentação

O conjunto experimental foi instrumentado com medidores de pressão e temperatura. As posições de instalação foram escolhidas em função dos parâmetros estudados. As temperaturas foram medidas através de termopares do tipo K e tipo T, monitorados com auxílio de um sistema de aquisição de dados, posicionados na seguinte ordem:

- Inserido dentro do leito fluidizado, junto à entrada da válvula cônica (tipo T ou K);
- Entrada e saída da água de resfriamento da válvula (tipo T);
- Tubo de saída de sólidos da válvula (tipo K).

A medição da temperatura da água de resfriamento foi feita objetivando analisar sua influência na temperatura de saída dos sólidos fluidizados.

As medidas de pressão foram realizadas utilizando-se de manômetros com tubo em U. As tomadas de pressão foram em quatro posições: uma na câmara de combustão (P1 – Figura 3.1),

no nível da entrada da válvula; e três outras no corpo da válvula. Essas três tomadas no corpo da válvula permitiram analisar a queda de pressão ao longo do corpo da mesma, porém verificou-se que as leituras nessas tomadas de pressão tinham pouca ou nenhuma variação entre si. Assim, visando otimizar a coleta de dados duas das três tomadas foram desativadas, mantendo-se a tomada representada na Figura 3.1 como P2, situada no tubo de saída da válvula.

Além destes instrumentos, foram utilizados dois rotâmetros, aplicados no monitoramento da vazão de GLP e de ar de fluidização para a câmara de combustão.

Todos os instrumentos mencionados podem ser vistos na Figura 3.1.

3.4 – Procedimento experimental

O procedimento experimental foi basicamente o mesmo para os testes a frio e a quente, A seguir é apresentado uma descrição detalhada do procedimento, inicialmente para os testes a frio:

- a) Inicializar o programa de aquisição de dados para monitorar as temperaturas;
- b) Encher o silo de armazenagem com o diâmetro do particulado a ser estudado;
- c) Acionar o compressor radial (Ibram – CR 5) para permitir o funcionamento da válvula pneumática e assim promover alimentação da câmara de combustão de forma contínua;
- d) Acionar o ventilador centrífugo (Kepler Weber), responsável pela fluidização da câmara de combustão;
- e) Iniciar a coleta de dados quando o material particulado dentro da câmara de combustão estava na quantidade desejada, monitorada através da tomada de pressão P1. Quando a válvula era aberta anotava-se as pressões nas duas tomadas P1 e P2, a temperatura ambiente e a descarga atingida para uma determinada condição de operação (conforme o planejamento experimental).

Nos testes em temperaturas elevadas havia etapas intermediárias, para que se pudesse coletar os dados desejados. Após as etapas a e b do procedimento anterior, alimentava-se a câmara de combustão de tal forma que o material particulado atingisse a altura de entrada da

válvula cônica. Dessa maneira, menos particulado na câmara, o tempo de aquecimento desses era menor. Neste ponto a válvula de GLP era totalmente aberta e imediatamente acesa a mistura ar-combustível, por meio de tocha umedecida em álcool. Quando a temperatura do particulado estava em torno de 650 °C, atingia-se a temperatura mínima de estabilidade da chama. Nesse momento a câmara de combustão era fechada com a tampa refratária e continuava-se a adição de sólidos na câmara até que a temperatura e a pressão no nível de entrada da válvula atingissem os valores desejados. Atingindo a altura de leito fluidizado desejada acionava-se o compressor radial (Ibram - CR 8) para a fluidização do leito no trocado de calor. A última etapa era idêntica ao procedimento dos testes a frio.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Os resultados, obtidos a partir da metodologia descrita no Capítulo 3, as observações experimentais e a análise estatística são apresentados neste capítulo. A análise estatística dos resultados experimentais foi dividida em três etapas: cálculo do desvio padrão experimental (S_{ef}), aplicação do teste estatístico “t” de Student e o cálculo dos efeitos principais e das interações dos fatores de influência. Segundo Holman (1994) o teste “t” de Student é o melhor método quando o número de experimentos é menor que 30.

Na tentativa de correlacionar os resultados experimentais levantados foram também realizados alguns testes além da metodologia proposta.

Neste estudo o desvio padrão experimental foi determinado através da realização dos experimentos em duplicata; embora estejam previstas outras técnicas para determiná-lo na metodologia do planejamento experimental, como utilizar os efeitos das interações de ordem mais alta, assumindo a hipótese de que pequenas variações nos fatores não causem variações abruptas na resposta.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, apresentam a matriz de planejamento completa, os resultados dos dezesseis experimentos relativos ao planejamento fatorial e os resultados dos efeitos e das interações, respectivamente. As Tabelas 4.1 e 4.2 complementam a Tabela 3.2, com os contrastes referentes às interações e com a coluna referente à resposta de interesse.

Tabela 4.1 – Matriz de planejamento em dois níveis completa.

Experimento	Fatores														
	1	2	3	4	12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Lembrando que os índices 1, 2, 3 e 4, na Tabela 4.1, são as variáveis : razão entre as áreas (A_o/A_t), queda de pressão entre as extremidades da válvula (ΔP_v), diâmetro médio do material particulado (\bar{d}_p) e temperatura do leito fluidizado (T_L), respectivamente e os demais índices são as interações entre elas.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos através do planejamento fatorial.

Experimento	Fatores				Resposta
	A_o/A_t [-]	ΔP_v [kPa]	\bar{d}_p [μm]	T_L [$^{\circ}\text{C}$]	\dot{M}_s [kg/h]
1	0,10	1,372	185	26	16,2
2	0,28	1,372	185	26	399,6
3	0,10	2,745	185	26	19,8
4	0,28	2,745	185	26	646,2
5	0,10	1,372	285	26	19,8
6	0,28	1,372	285	26	342,0
7	0,10	2,745	285	26	23,4
8	0,28	2,745	285	26	637,2
9	0,10	1,372	185	750	88,2
10	0,28	1,372	185	750	370,8
11	0,10	2,745	185	750	127,8
12	0,28	2,745	185	750	486,0
13	0,10	1,372	285	750	120,6
14	0,28	1,372	285	750	298,8
15	0,10	2,745	285	750	156,6
16	0,28	2,745	285	750	475,2

Os valores da resposta na Tabela 4.2 representam a média de duas medidas. A incerteza experimental na medida da descarga de sólidos variou entre 0,32 e 12,92 kg/h e foi calculada segundo Holman (1994), como mostrado no Anexo III. Para o cálculo dos efeitos foi utilizada a Equação 3.1, cujo exemplo para determiná-los é demonstrado aqui para o efeito da razão entre áreas (A_o/A_t) sobre a descarga de sólidos (\dot{M}_s). Escolhido o fator do qual se deseja calcular o efeito, neste caso o fator 1, deve-se aplicar os sinais contidos na coluna do fator (Tabela 4.1) aos valores obtidos experimentalmente, presentes na coluna da resposta procurada (Tabela 4.2),

para este exemplo a descarga de sólidos. A próxima etapa é obter a diferença entre a média dos valores com sinais positivos e a média dos valores com sinais negativos. Assim:

$$E_f = \bar{q}^+ - \bar{q}^- \quad (3.1)$$

$$E_f = \left[\frac{1}{8} (399,6 + 646,2 + 342 + 637,2 + 370,8 + 486 + 298,8 + 475,2) \right] - \left[\frac{1}{8} (16,2 + 19,8 + 19,8 + 23,4 + 88,2 + 127,8 + 120,6 + 156,6) \right]$$

$$E_f = 385,43 \text{ kg/h}$$

Antes da apresentação dos resultados das estimativas dos efeitos foi calculado o desvio padrão experimental dos efeitos a partir dos valores da coluna de respostas da Tabela 4.2 e das equações 3.3, 3.4 e 3.5, para que a avaliação estatística pudesse ser realizada. O desvio experimental obtido foi $\pm 6,68 \text{ kg/h}$ para a descarga de sólidos através da válvula. A segunda etapa, como mencionado no parágrafo inicial deste Capítulo, foi analisar se a estimativa dos efeitos dos fatores é estatisticamente significativa, para tanto, deve-se multiplicar os efeitos pelo valor “t” de Student, que neste trabalho foi com nível de confiança de 95% e com 16 graus de liberdade. Da Tabela IV.1, Anexo IV, tem-se o valor correspondente de “t” igual a 2,120. Assim, o efeito será significativo estatisticamente se seu valor absoluto for maior que o resultado da multiplicação ($S_{ef} \times t$), ou seja, maior que $14,16 \text{ kg/h}$ para a descarga de sólidos particulados.

A Tabela 4.3 apresenta os valores calculados das estimativas dos efeitos de cada um dos fatores e das interações. Nessa tabela também constam os resultados da avaliação de quais efeitos ou interações são estatisticamente significativos. A interpretação da avaliação estatística da Tabela 4.3 é baseada na nomenclatura: SE (significativo estatisticamente) e NSE (não significativo estatisticamente).

Tabela 4.3 – Resultados das estimativas dos efeitos e da avaliação estatística desses.

Fatores	Estimativa do efeito	Resultado estatístico
	\dot{M}_s [kg/h]	
1 (A_o/A_t)	385,43	SE
2 (ΔP_v)	114,53	SE
3 (\bar{d}_p)	-10,13	NSE
4 (T_L)	2,48	NSE
12	93,83	SE
13	-27,23	SE
14	-101,03	SE
23	13,28	NSE
24	-22,73	SE
34	4,73	NSE
123	14,18	SE
124	-39,83	SE
134	-8,78	NSE
234	-1,13	NSE
1234	2,02	NSE

4.1 – Interpretação dos efeitos obtidos

A primeira consideração na interpretação dos efeitos é saber o significado dos sinais, positivos e negativos, que estão presentes na coluna central da Tabela 4.3. O sinal positivo significa que ao mudar do nível inferior para o superior de um mesmo fator há um ganho na variável de resposta, neste trabalho, há um aumento na descarga de sólidos. A interpretação do sinal negativo tem efeito contrário sobre a resposta, há uma perda quando o nível do fator passa do inferior para o superior. O valor em módulo do efeito permite concluir sobre sua relevância, ou seja, quanto maior for, maior será o ganho ou a perda da variável de resposta. O fato de alguns

efeitos de interação serem significativos estatisticamente indica que os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente. As Figuras 4.1 a 4.5 são exemplos de diagramas que permitem a análise simultânea de dois fatores sobre a variável de interesse. Essas figuras são montadas utilizando-se os resultados obtidos experimentalmente.

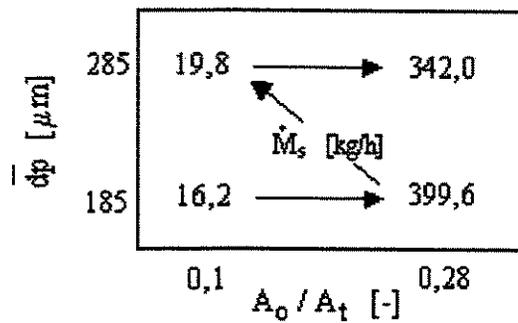
A influência dos parâmetros sobre a descarga de sólidos através da válvula será também analisada utilizando-se a metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*). A metodologia é constituída de duas etapas: modelagem e deslocamento. Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (1995), “as etapas são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de atingir-se uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada”.

Para a construção gráfica das superfícies de resposta foi utilizado o programa *Statistic for Windows 5.0*. Na construção das superfícies de resposta faz-se uso de uma hipótese simplificadora, que segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (1995), consiste da admissão de que os efeitos principais e as interações de dois fatores são suficientes para descrever adequadamente a superfície de resposta, não necessitando utilizar-se das interações de três e quatro fatores. As interações de três e quatro fatores podem, como mencionado no início deste capítulo, ser utilizadas para estimar o desvio padrão experimental.

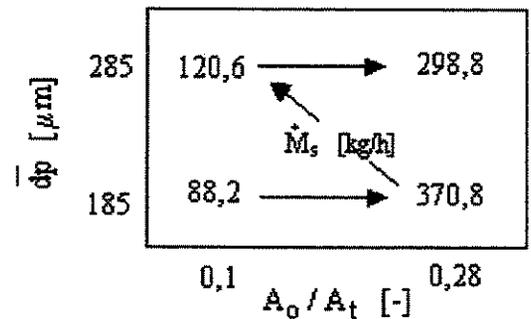
4.1.1 – Interpretação sobre os efeitos para a descarga de sólidos.

A partir da Tabela 4.3 verifica-se que somente dois fatores (A_v/A_t e ΔP_v) dos quatro considerados são estatisticamente significativos e influem na descarga de sólidos de maneira a aumentá-la, quando passam de seus níveis inferiores para os superiores. As Figuras 4.1 a 4.4 mostram a influência desses fatores simultaneamente com o diâmetro médio do particulado e com a temperatura do leito fluidizado. A Figura 4.5 permite a observação simultânea dos fatores razão entre a área de abertura da válvula e a área do tubo de entrada e queda de pressão entre as extremidades da válvula cônica sobre a descarga de sólidos particulados.

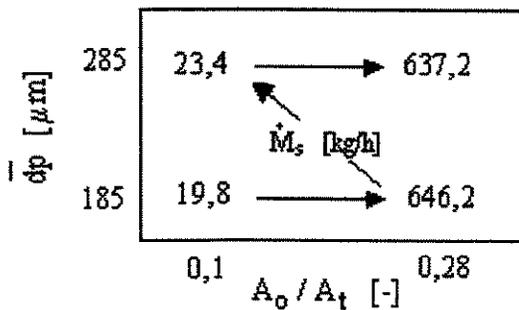
A Figura 4.1 mostra o aumento da descarga de sólidos, para ambos diâmetros de partícula, quando a razão A_o/A_t passa para o seu nível superior, para as quatro combinações de T_L e ΔP_v testadas. A interpretação gráfica da interação dos fatores razão A_o/A_t e \bar{d}_p , interação 13, é através da diagonal mostrada na Figura 4.1. O sentido da diagonal, interligando os níveis superiores dos fatores principais, representa o sinal negativo encontrado na Tabela 4.3 referente à estimativa do efeito da interação 13. A diagonal mostra a diminuição da descarga de sólidos particulados através da válvula cônica, confirmando a análise estatística realizada. A diminuição da descarga de sólidos é observada em todas as configurações experimentais, representadas pelas letras a, b, c e d.



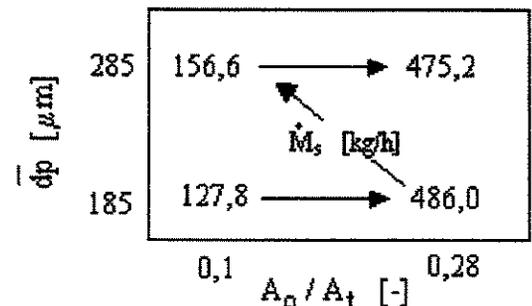
a) $T_L=26\text{ }^\circ\text{C}$ e $\Delta P_v=1,372\text{ kPa}$



b) $T_L=750\text{ }^\circ\text{C}$ e $\Delta P_v=1,372\text{ kPa}$



c) $T_L=26\text{ }^\circ\text{C}$ e $\Delta P_v=2,745\text{ kPa}$



d) $T_L=750\text{ }^\circ\text{C}$ e $\Delta P_v=2,745\text{ kPa}$

Figura 4.1 - Diagrama para a interpretação dos efeitos A_o/A_t e \bar{d}_p sobre \dot{M}_s

Na Figura 4.2 observa-se o aumento da descarga de sólidos quando o fator queda de pressão entre as extremidades da válvula varia de 1,372 kPa (nível inferior) para 2,745 kPa (nível superior), confirmando o resultado apresentado na Tabela 4.3 para o fator 2. A influência da interação 23 (efeito conjunto da ΔP_v e \bar{d}_p sobre \dot{M}_s) é, a exemplo da Figura 4.1, interpretada através da diagonal que interliga os níveis superiores dos fatores. A observação da diagonal nas combinações c e d da Figura 4.2 mostra maior redução da descarga de sólidos do que nas combinações a e b, onde nenhuma ou pequena redução na descarga de sólidos é verificada, demonstrando que o diâmetro médio do particulado deve ser considerado, principalmente nas menores aberturas da válvula cônica. Este resultado é contrário ao encontrado através da análise estatística, onde o diâmetro médio do particulado (\bar{d}_p) não apresentou influência significativa, provavelmente devido ao fato de existir diferença pequena entre os diâmetros médios das partículas utilizadas nos experimentos (185 e 285 μm).

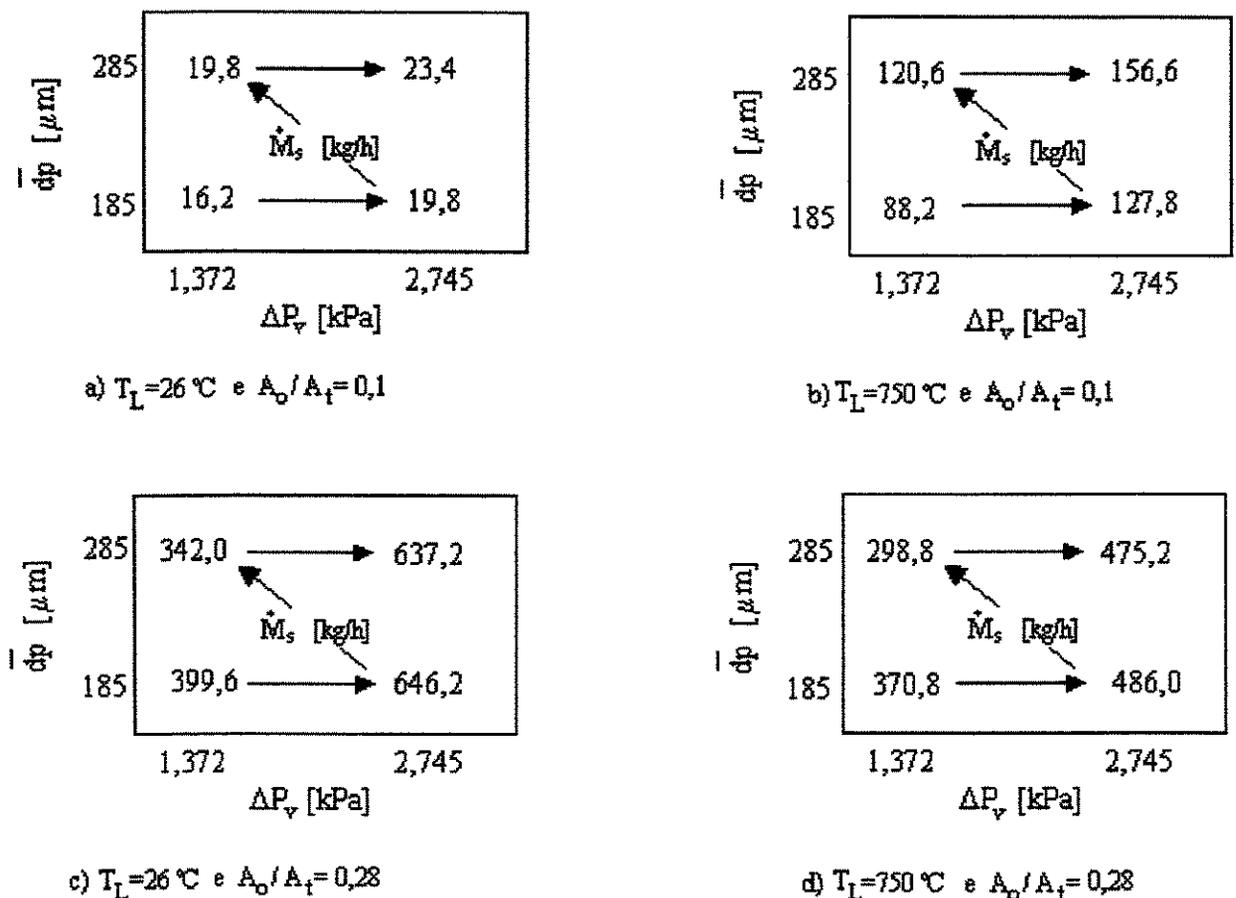
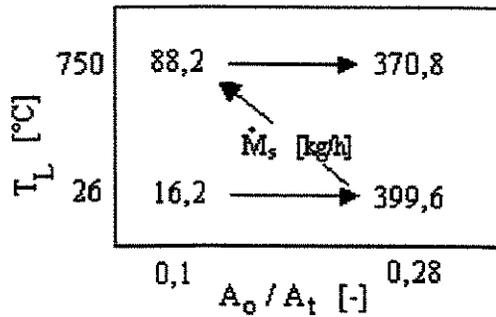
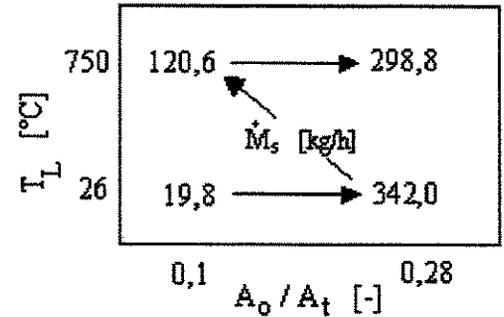


Figura 4.2 - Diagrama para a interpretação dos efeitos ΔP_v e \bar{d}_p sobre \dot{M}_s

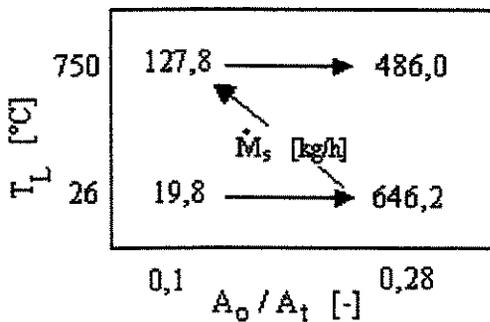
A interpretação do diagrama representado pela Figura 4.3 é idêntica à realizada nas figuras anteriores, onde o efeito do fator principal A_o/A_t quando passa de seu nível inferior para o superior aumenta a descarga de sólidos. A influência da interação entre A_o/A_t e T_L , observada através da diagonal traçada na figura, tem uma ação redutora sobre a mesma, ou seja, diminui a descarga de sólidos particulados através da válvula, como indicado através da análise estatística (interação 14), Tabela 4.3.



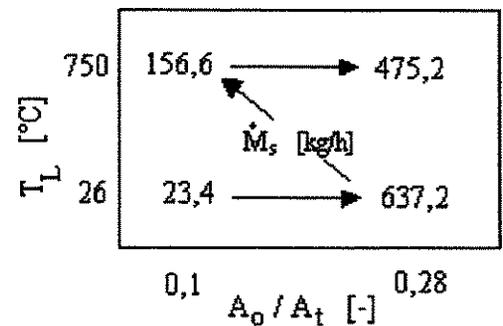
a) $dp=185 \mu\text{m}$ e $\Delta P_v=1,372 \text{ kPa}$



b) $dp=285 \mu\text{m}$ e $\Delta P_v=1,372 \text{ kPa}$



c) $dp=185 \mu\text{m}$ e $\Delta P_v=2,745 \text{ kPa}$



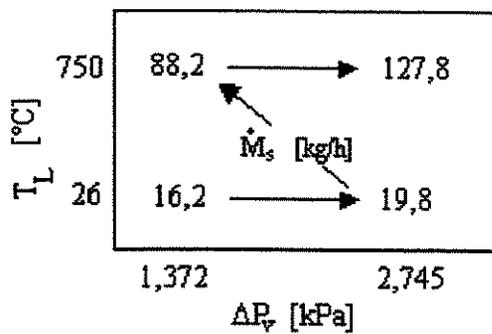
d) $dp=285 \mu\text{m}$ e $\Delta P_v=2,745 \text{ kPa}$

Figura 4.3 - Diagrama para a interpretação dos efeitos A_o/A_t e T_L sobre \dot{M}_s

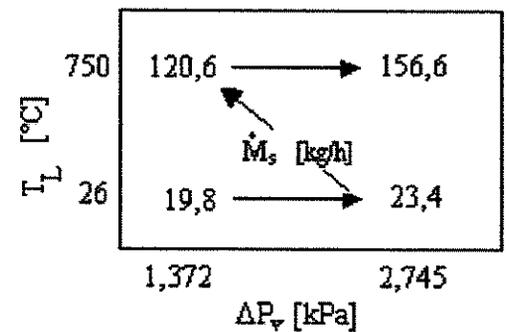
A observação da Figura 4.4 quanto à análise do efeito do fator ΔP_v sobre a descarga de sólidos confirma o exposto até o momento, porém, ao se analisar a interação desse fator com o fator temperatura do leito fluidizado verifica-se que em condição de menor razão entre a área de

abertura da válvula e a área do tubo de entrada (Figura 4.4 a e b) encontra-se variação oposta à prevista pela análise estatística, onde a interação 24 resultou em valor negativo. O aumento da descarga de sólidos na direção da diagonal é atribuído à dilatação térmica ocorrida no tubo de entrada da válvula.

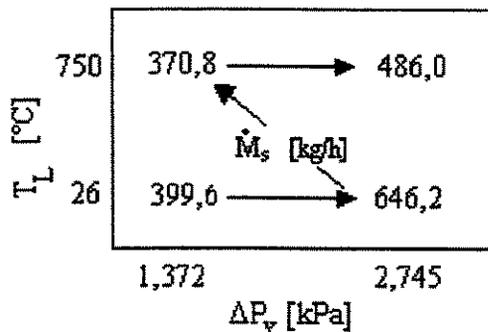
A dilatação do tubo de entrada foi da ordem de 1,30 %, calculada segundo de Beer e Johnston (1982), o que representa um aumento no diâmetro do menor tubo de entrada de aproximadamente uma vez o diâmetro do maior particulado utilizado neste trabalho.



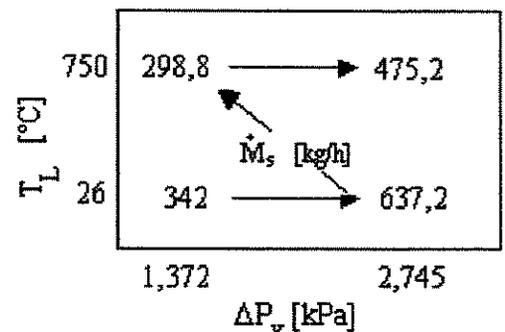
a) $d_p=185 \mu\text{m}$ e $A_o/A_i=0,1$



b) $d_p=285 \mu\text{m}$ e $A_o/A_i=0,1$



c) $d_p=185 \mu\text{m}$ e $A_o/A_i=0,28$



d) $d_p=285 \mu\text{m}$ e $A_o/A_i=0,28$

Figura 4.4 – Diagrama para interpretação dos efeitos ΔP_v e T_L sobre \dot{M}_s

A importância desse aumento é mensurada considerando-se que a área efetiva do tubo de entrada pode ser representada pela Equação (2.18 a) e que a descarga através de um orifício pode ser representada pela Equação (2.22), conforme proposto por Geldart e Haesebrouck (1983), assim:

$$A_{ef} = \frac{1}{4} \pi (d_o - k\bar{d}_p)^2 \quad (2.18a)$$

$$\dot{M}_s = C_d \rho_L \cdot m_f \frac{\pi}{4} (d_o - k\bar{d}_p)^2 \sqrt{2gH} \quad (2.22)$$

Admitindo-se o aumento do diâmetro do tubo de entrada devido à dilatação térmica em uma vez o diâmetro médio do particulado tem-se:

$$A_{ef} = \frac{1}{4} \pi [(d_o + \bar{d}_p) - k\bar{d}_p]^2 \quad (4.1)$$

Arranjando a equação

$$A_{ef} = \frac{1}{4} \pi [d_o + \bar{d}_p(1 - k)]^2$$

Substituindo na Equação (2.22) e arranjando, encontra-se a descarga de sólidos em condições de temperatura elevada do leito fluidizado:

$$\dot{M}_s = C_d \rho_L \cdot m_f \frac{\pi}{4} [d_o - \bar{d}_p(k - 1)]^2 \sqrt{2gH} \quad (4.2)$$

Comparando-se as equações (2.22) e (4.2), verifica-se que por meio desta última obtêm-se maiores descargas de sólidos com o aumento da temperatura em função da dilatação do tubo de entrada. Observa-se que o efeito da dilatação térmica torna-se importante em condições onde pequenas aberturas da válvula são utilizadas.

A Figura 4.5 apresenta o diagrama para a interpretação dos efeitos dos dois fatores principais estatisticamente significativos (A_o/A_t e ΔP_v). Verifica-se que ao passar para o nível superior de qualquer dos dois fatores há um ganho na resposta, confirmando a análise estatística. A interpretação da interação dos fatores razão entre as áreas de abertura da válvula e do tubo de entrada e queda de pressão entre as extremidades da válvula é feita de maneira oposta às figuras anteriores, pois essa interação influencia na resposta desejada promovendo um ganho desta. Gráficamente este efeito positivo é observado acompanhando a diagonal que liga o nível (--) ao nível (++) , como representado na Figura 4.5.

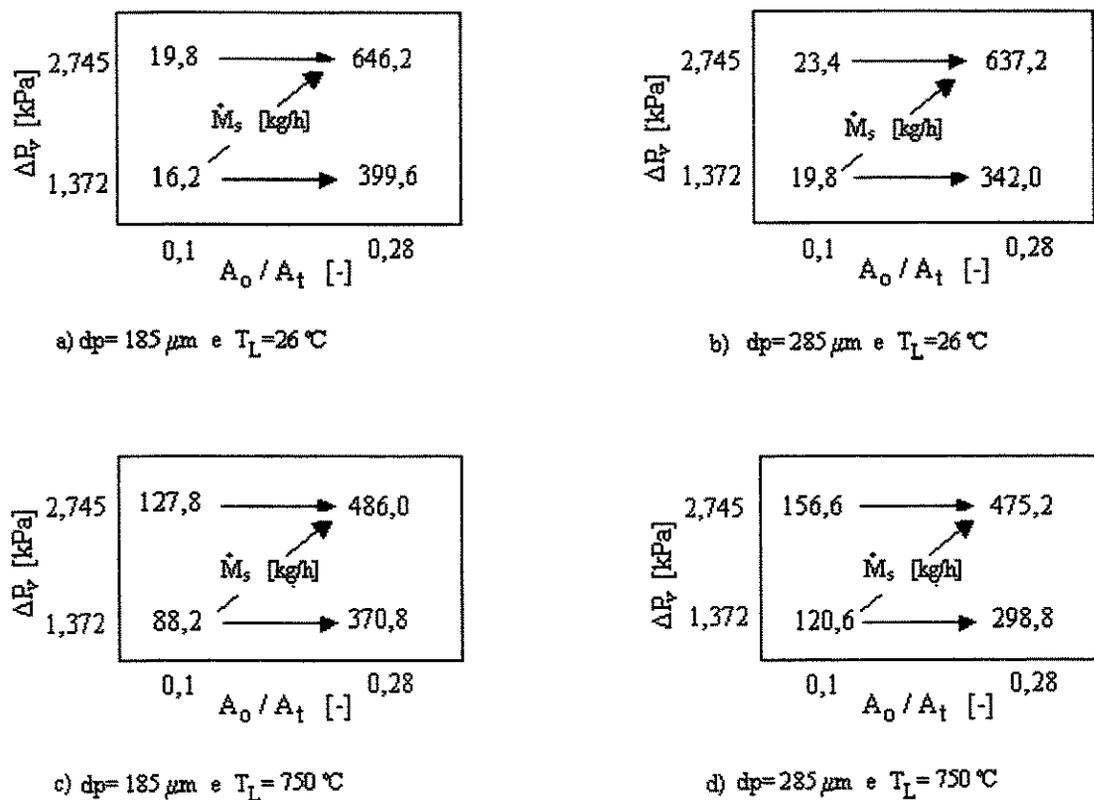


Figura 4.5 – Diagrama para interpretação dos efeitos A_o/A_t e ΔP_v sobre \dot{M}_s

As Figuras 4.6 a 4.9 demonstram os resultados da aplicação da técnica de superfície de resposta. As superfícies são construídas em duas etapas: a modelagem e o deslocamento. Na modelagem são utilizados os dois fatores estatisticamente significativos (A_o/A_t e ΔP_v) como base para a construção e no deslocamento da superfície são alternados os níveis inferior e superior das variáveis: diâmetro da partícula e temperatura do leito. Com este procedimento pode-se estimar,

através da superfície, em que configurações experimentais obtêm-se maiores ou menores descargas de sólidos particulados.

Faixas mais amplas de descarga de sólidos são obtidas com a configuração operando em condições a frio, Figuras 4.6 e 4.8. Porém, a configuração representada pela menor razão A_o/A_t e pela operação em temperaturas elevadas (Figuras 4.7 e 4.9) apresenta descarga de sólidos cerca de três vezes maior às obtidas em temperaturas a frio. Este aumento é analisado igualmente a Figura 4.4 como devido à influência da dilatação do tubo de entrada da válvula.

A situação oposta à apresentada anteriormente, ou seja, a descarga de sólidos diminui com o aumento da temperatura é observada através das Figuras 4.7 e 4.8, para a maior razão A_o/A_t . A diminuição da descarga de sólidos para esta configuração é causada possivelmente por um aumento na porosidade do leito fluidizado, devido à elevação de temperatura, que segundo Kunii e Levenspiel (1991) pode ser da ordem de 8% para temperaturas acima de 500 °C. Esse aumento de porosidade do leito faz com que menor acúmulo de partículas no tubo de entrada da válvula ocorra, explicando a redução da descarga de sólidos encontrada para as maiores aberturas.

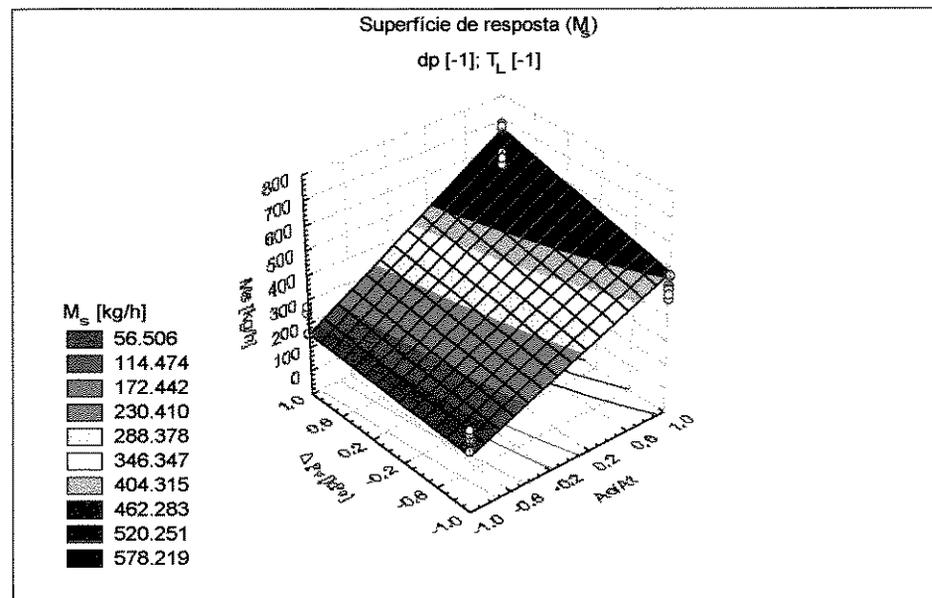


Figura 4.6 – Superfície de resposta para \dot{M}_s
 ($\bar{d}_p [-1]$ e $T_L [-1]$)

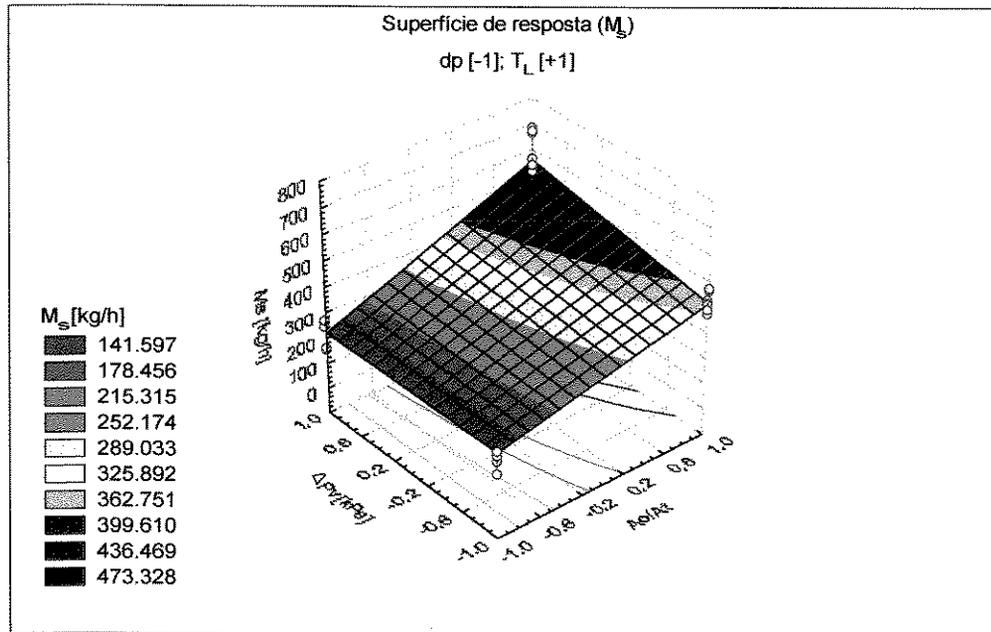


Figura 4.7 – Superfície de resposta para \dot{M}_s
($\bar{d}p$ [-1] e T_L [+1])

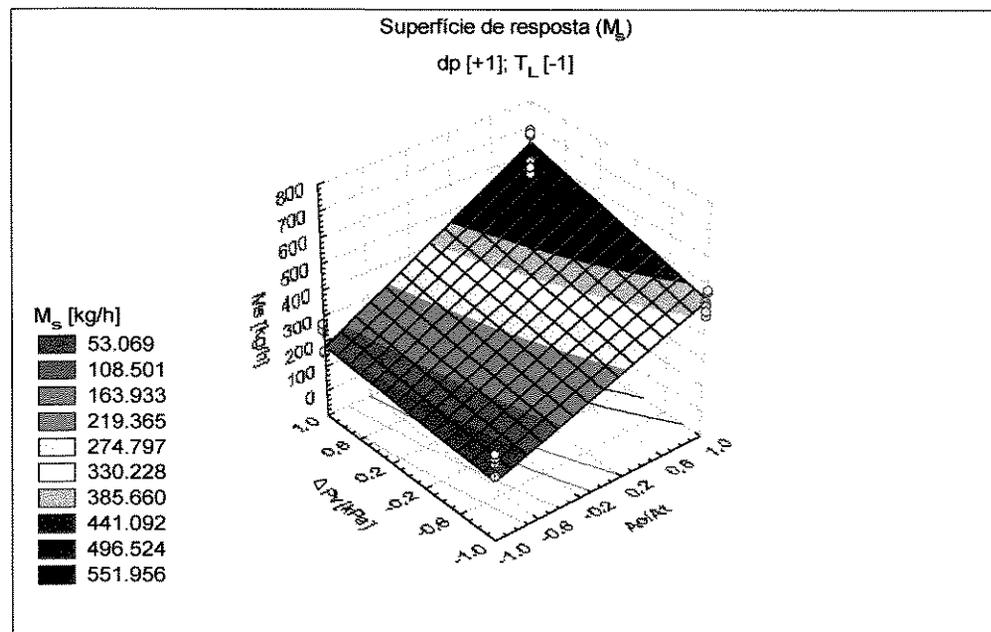


Figura 4.8 – Superfície de resposta para \dot{M}_s
($\bar{d}p$ [+1] e T_L [-1])

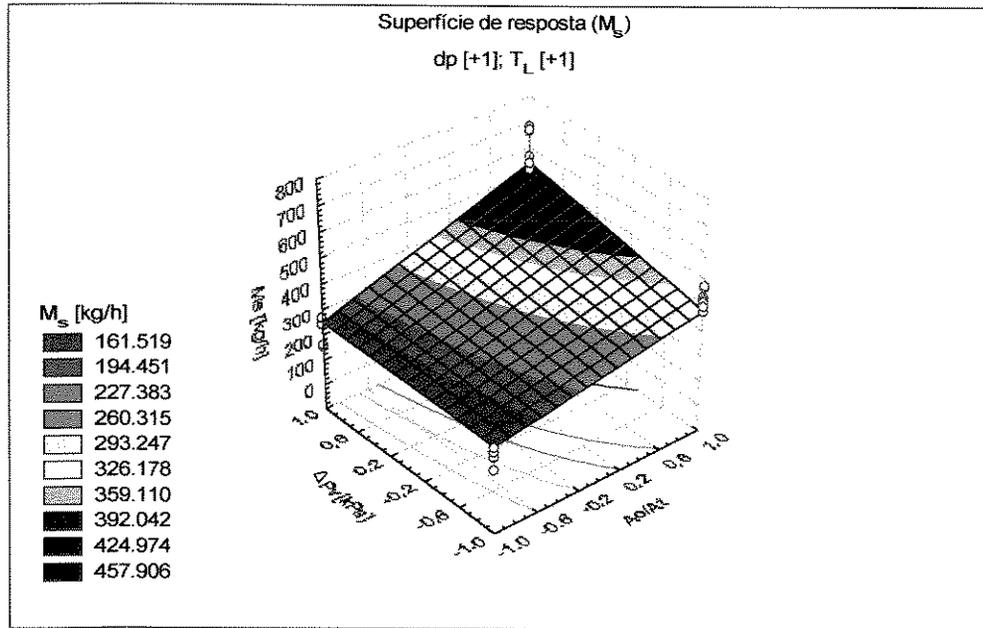


Figura 4.9 – Superfície de resposta para \dot{M}_s
 ($\bar{d}p$ [+1] e T_L [+1])

Objetivando-se obter a descarga de sólidos particulados em diferentes aberturas da válvula cônica foram coletados dados adicionais em condições de experimentos a frio. Os resultados desses experimentos são apresentados na Tabela 4.4.

A coleta de dados compreendeu a realização de experimentos em mais três razões A_c/A_t , além da razão prevista no planejamento fatorial. Foi também registrada a pressão no interior da válvula através da tomada de pressão P2, mostrada na Figura 3.6, o que permitiu a obtenção da queda de pressão no tubo de saída da válvula ($\Delta P_{t,s}$).

Tabela 4.4 – Resultados dos experimentos adicionais ($T_L = 26\text{ }^\circ\text{C}$).

A_o/A_i [-]	ΔP_v [kPa]	\bar{d}_p [μm]	ΔP_{ts} [kPa]	\dot{M}_s [kg/h]
0,10	1,372	185	0,039	16,2
0,19	1,372	185	0,230	85,2
0,22	1,372	185	0,319	111,6
0,28	1,372	185	0,525	188,4
0,10	1,372	185	0,157	48,6
0,19	1,372	185	0,495	214,8
0,22	1,372	185	0,490	282,0
0,28	1,372	185	0,647	399,6
0,10	2,745	185	0,049	19,8
0,19	2,745	185	0,245	104,4
0,22	2,745	185	0,368	134,4
0,28	2,745	185	0,534	268,8
0,10	2,745	185	0,176	46,8
0,19	2,745	185	0,505	201,6
0,22	2,745	185	0,637	416,4
0,28	2,745	185	0,750	646,2
0,10	1,372	285	0,069	19,8
0,19	1,372	285	0,157	42,0
0,22	1,372	285	0,333	99,6
0,28	1,372	285	0,515	261,6
0,10	2,745	285	0,059	23,4
0,19	2,745	285	0,181	66,0
0,22	2,745	285	0,407	160,5
0,28	2,745	285	0,549	295,2

A relação direta entre o aumento da descarga de sólidos particulados através da válvula cônica com o aumento da razão A_o/A_t é mostrada nas Figuras 4.10a e 4.10b, para as quedas de pressão entre as extremidades da válvula de 1,372 kPa e 2,745 kPa, respectivamente. A construção dessa figura permite selecionar a razão A_o/A_t para a descarga de sólidos particulados desejada, desde que se conheça a queda de pressão entre as extremidades da válvula e o diâmetro da partícula.

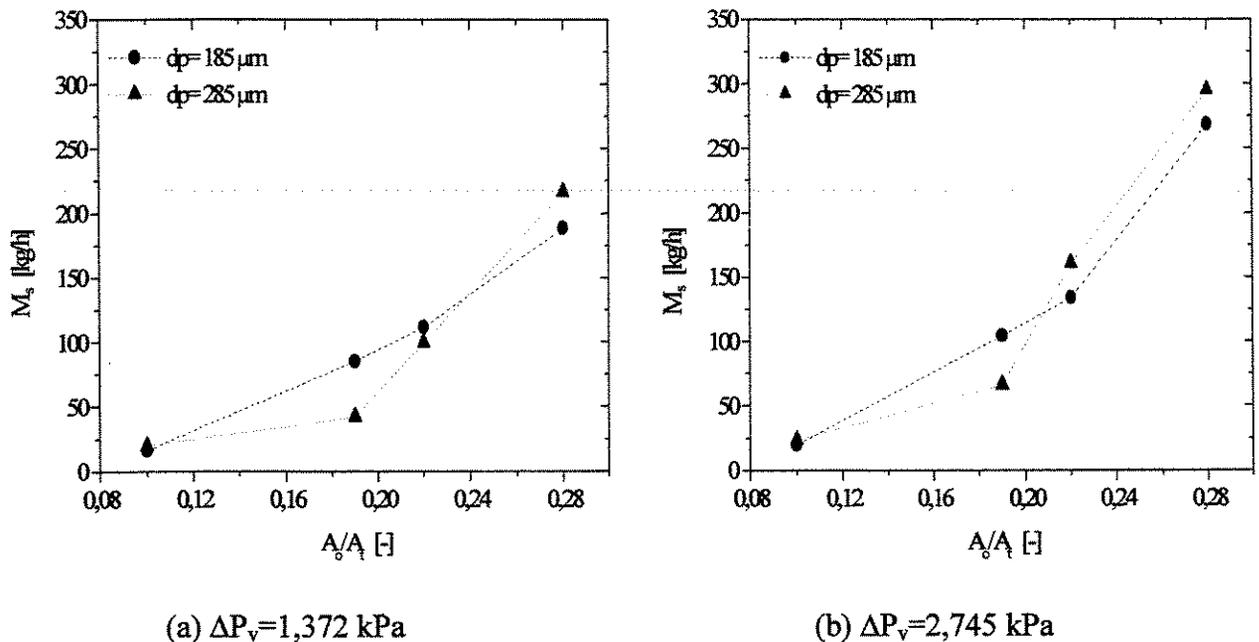


Figura 4.10 - Descarga de sólidos em função da razão A_o/A_t .

Observa-se na Figura 4.10 que para alguns valores intermediários da razão A_o/A_t , existe uma diferença considerável entre os valores da descarga de sólidos particulados obtidos para os dois tamanhos de partícula analisados, confirmando a necessidade de se aumentar a faixa de diâmetro de partícula analisada para a verificação da influência desse parâmetro, principalmente nas menores aberturas da válvula.

A Figura 4.11 mostra o aumento da pressão no interior da válvula cônica com o aumento da descarga de sólidos. Mantendo-se constante a queda de pressão entre as extremidades da válvula

em 1,372 kPa (Figura 4.11a) e 2,745 kPa (Figura 4.11b), o aumento da descarga de sólidos somente é obtido com a variação positiva da abertura da válvula, promovendo maior concentração de sólidos no interior da válvula e conseqüente elevação da queda de pressão no tubo de saída.

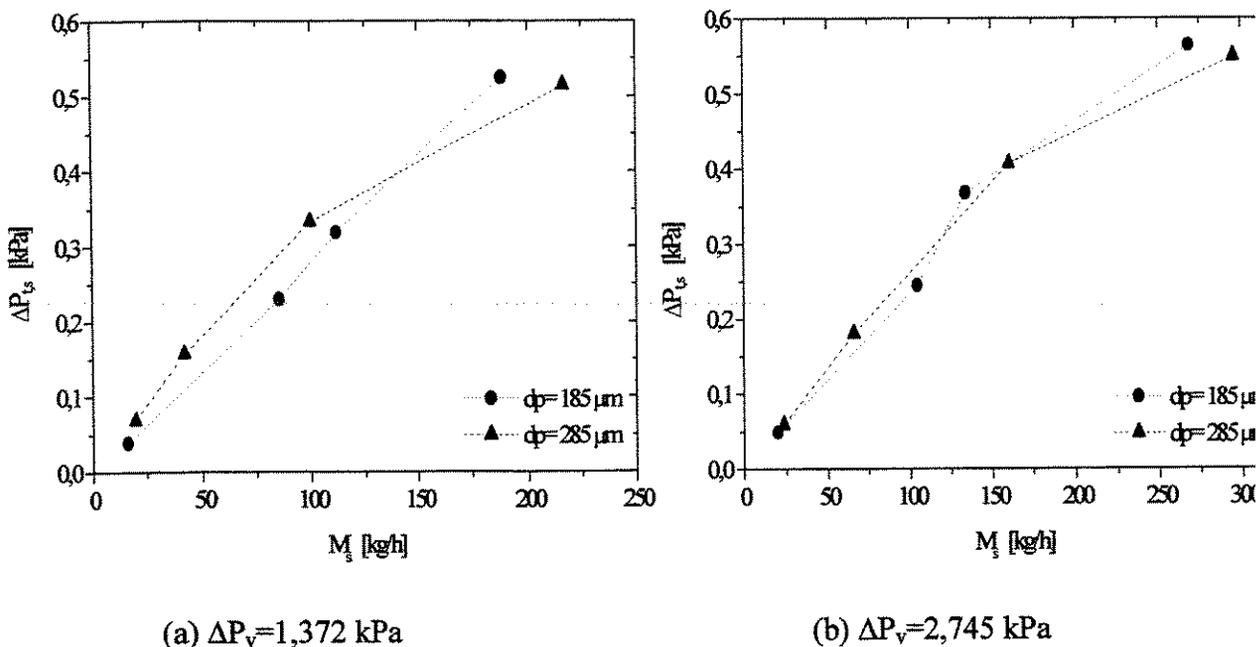


Figura 4.11 - Queda de pressão no tubo de saída da válvula em função da descarga de sólidos.

A análise dos resultados obtidos identificou os fatores que exercem influência significativa sobre as variáveis de resposta: descarga de sólidos através da válvula. Identificados os fatores, é possível planejar os testes experimentais com valores intermediários desses, buscando assim correlacionar os dados experimentais, o que permite a previsão da descarga de sólidos através da válvula para qualquer variação dos fatores dentro da faixa analisada.

As dificuldades encontradas ao longo do experimento impediram que tal etapa fosse realizada, sendo deixada como sugestão para trabalho futuro.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a proposição de uma nova geometria de válvula de alimentação adequada para o controle da descarga de sólidos particulados aquecidos em um leito fluidizado. A válvula cônica desenvolvida apresentou estabilidade e repetibilidade nos valores da descarga de sólidos.

O levantamento da literatura permitiu a identificação de quatro fatores de influência sobre a descarga de sólidos através da válvula: razão entre a área de abertura e a área do tubo de entrada da válvula; queda de pressão entre as extremidades da válvula; diâmetro médio do material particulado e temperatura do leito fluidizado na câmara de combustão.

A análise estatística da influência desses fatores permitiu as seguintes conclusões:

- Para a descarga de sólidos escoando através da válvula somente os fatores razão entre a área de abertura e a área do tubo de entrada da válvula e queda de pressão entre as extremidades da válvula são estatisticamente significativos;
- Os fatores diâmetro médio do material particulado e temperatura do leito fluidizado somente têm influência estatística sobre a descarga de sólidos através da válvula cônica quando interagem com fatores razão entre a área de abertura e a área do tubo de entrada da válvula e queda de pressão entre as extremidades da válvula.

- A descarga de sólidos através da válvula é diretamente proporcional à ambos fatores estatisticamente significativos: razão entre a área de abertura e a área do tubo de entrada da válvula e à queda de pressão entre as extremidades da válvula;
- Faixas mais amplas de operação para a descarga de sólidos foram obtidas nos testes a frio.
- A dilatação térmica do tubo de entrada da válvula, ocorrida nos teste a quente, torna-se mais importante em condições de pequenas aberturas da válvula, onde houve um aumento da descarga de sólidos particulados, com a elevação da temperatura do leito fluidizado.
- A queda de pressão no tubo de saída da válvula é proporcional à descarga de sólidos em função da elevação da concentração de material sólido no interior da válvula com o aumento da sua abertura.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se:

- Obter uma correlação para a descarga de sólidos em função das variáveis testadas.
- Investigar a influência da massa específica do material sólido;
- Estudar o efeito do comprimento do tubo de entrada sobre a descarga de sólidos e sobre o estabilidade do escoamento dos sólidos através da válvula;
- Ampliar a faixa do diâmetro médio da partícula;
- Estudar o efeito da inclinação e do comprimento do tubo de saída da válvula.

Referências Bibliográficas

- Arena, U., Langeli, C.B., Cammarota, A. L-valve Behaviour with Solids of Different Size and Density. *Powder Technology*, v. 98, n. 3, p. 231-240, Aug. 1998
- ABNT, INMETRO, SBM, Rio de Janeiro. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. Rio de Janeiro, 1998. 121p.
- Barros Neto, B., Scarminio, I.S., Bruns, R.E. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Campinas: Editora da Unicamp, 1995, 299 p.
- Baumann, H.D Viscosity Flow Correction for Small Controle Valve Trim. *Transactions of the ASME*, v. 113, p. 86-89, Mar. 1991
- Beer, F.P., Johnston, E.R.Jr. *Resistência dos Materiais*. McGraw-Hill, São Paulo, 1982.
- Beverloo, W.A., Leniger, H.A., van de Velde, J. The Flow of Granular Solids through Orifices. *Chemical Engineering Science*, v. 15, n. 3 e 4, p. 260-269, Sep. 1961
- Bhattacharya, B., Sathiyamoorthy, D., Govardhana Rao, V., Mahajan, S.P. Solid Circulation in a Compartmented Gas Fluidized Bed. *Powder Technology*, v. 101, n. 3, p. 191-204, Mar 1998
- Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S. *Statistics for Experiments – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*, New Jersey. 1978.

- Buslara, P.U., Zenz, F.A., Eckert, R.A. Pressure and Addtive Effects on flow of Bulk Solids. *Industrial and Enginering Chemitry Process Design and Development*, v. 3, n. 4, p. 348-355, Oct. 1964
- Chen, T., Walawender, W.P., Fan, L.T. Moving-Bed Solids Flow in a Inclined Pipe Leading into a Fluidized Bed. *Aiche Journal*, v. 26, n.1, p. 24-36, Jan. 1980
- Cheng, Y., Wei, F., Yang, G., Jin, Y. Inlet and Outlet Effects on Flow Patterns in Gas-Solid Riser. *Powder Technology*, v. 98, n.2, p. 151-156, Aug. 1998
- Daous, M.A., Al-Zahrani, A.A. Modeling Solids and Gas Flow through an L-Valve. *Powder Technology*, v. 99, n.1, p. 86-89, Sep. 1998
- Davidson, J.F., Clify, R., Harrison, D. *Fluidization.*, 2nd edition. Academic Press Inc., London, 1985
- Davies, C.E., Dawson, S.G.B., Hartley, M. Venturi Feeders for Pneumatic Conveying: Charactristics of Different Feeder Types. In: Australiasian Chemical engineering Conference, 18th, 1990, Auckland Nwe Zealand, 27-30 Aug., p. 454-461
- da Silva, M.G.C., Pécora, A.A.B. Estimativa da Queda de Pressão e Parâmetros de Projeto para Sistemas Bifásico Gás-Sólido. In: Encontro Sobre Escoamentos em Meios Porosos, 18, 1990, Nova Friburgo, RJ. *Anais do XVIII ENEMP*. Nova Friburgo, 1990, 279-287
- da Silva, M.G.C., *et. al.* Estudo do Desempenho da Válvula L em um Leito Fluidizado Circulante. In: 10^o Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo-SP, 13-16 Sep. 1994
- de Jong, J.A.H. Vertical Air-Controlled Particle Flow from a Bunker through Circular Orifices. *Powder Technology*, v. 3, p. 279-286, 1969
- Ferrari, G, Bell, T.A. Effect of Aeration on the Discharge Behaviour of Powders. *Powder Handling & Porcessing*, v. 10, n.3, p. 269-274, Jul/Sep. 1998

- Geldart, D. *Gas Fluidization Technology*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1986, 467 p.
- Geldart, D. Types of Gas Fluidization. *Powder Technology*, v. 7, n. 5, p. 285-292, 1973
- Geldart, D., Haesebrouck, M. Studies on the Intermittent Discharge of Coarse Solids from Fluidized Beds. *Chemical Engineering Research Design*, v. 61, n. 4, p. 224-232, Jul. 1983
- Geldart, D., Jones, P. The Behaviour of L-Valves with Granular Powders. *Powder Technology*, v. 67, n. 2, p. 163-174, Aug. 1991
- Geldart, D., Williams, J.C. Flooding from Hoppers: Identifying Powders Likely to Give Problems. *Powder Technology*, v. 43, n. 2, p. 181-183, Jul. 1985
- Grace, J.R. Contacting Modes and Behaviour Classification of Gas-Solid and other Two-Phase Suspensions. *Canadian Journal Chemical Engineering*, v. 64, p. 353-363
- Haaker, G., Van Poppelen, M.P., Jongejan, M.P., Bekhuis, J.H. A Method to Optimize Screw Feeder Geometry for Equable Draw-Dawn Performance. *Powder Handling & Processing*, v. 6, n. 2, p. 209-214, Apr-Jun. 1994
- Holman, J.P. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, Inc, 1994, 6th edition, 616 p.
- Knowlton, T.M., Hirsan, I. L-Valves Characterized for Solids Flow. *Hydrocarbon Processing*, v. 57, n. 3, p. 149-156, Mar. 1978
- Kunii, D. Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinemann, 1991. 2nd edition. 491 p.
- Leung, L.S., Chong, Y.O., Lottes, J. Operation of V-Valves for Gas-Solid Flow. *Powder Technology*, v. 49, n. 3, p. 271-276, Feb. 1987

- Li, H., Hong, R., Wang, Z. Fluidizing Ultrafine Powders with Circulating Fluidized Bed. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 22, p. 5609-5615, Nov. 1999
- Li, H., Kwauk, M. Hydrodynamics of the V-Valve. *Transactions of Institution of Chemical Engineers*, v. 69, n. 5, p. 355-360, Sep. 1991
- Li, Y., *et al.* Behavior of Gas-Solid Flow in the Downcomer of a Circulating Fluidized Bed Reactor with a V-Valve. *Powder Technology*, v. 91, n. 1, p. 11-16, Apr. 1997
- Maton, A.E. Screw Feeder Design. *Powder Handling & Processing*, v. 6, n. 1, p. 87-89, Jan-Mar. 1994
- Merrow, E.W. Linking R&D to Problems Experienced in Solids Processing. *Chemical Engineering Progress*, v. 81, n. 5, p. 14-22, May 1985
- Michon, G.J. About Rotary Valves and Air Leakages. *Powder Handling & Processing*, v. 8, n. 3, p. 241-247, Jul-Sep. 1996
- Mohsenim, N.N. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. In: Structure, physical characteristics and mechanical properties, Bordon and Beach Sci. Pub, New York, 1970.
- Mori *et al.* Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed. Proceedings of the 3rd International Conference on Circulating Fluidized Beds, Oct 15-18, Nagoya, Japan, p. 4.5.1-4.56.
- Parise, M.R.. Estudo Experimental do Resfriamento de Partículas Sólidas em Trocador de Calor com Leito Fluidizado Raso. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 86p. Dissertação (Mestrado)
- Pécora, A.A.B., Goldstein Jr., L, Lombardi, G., Pagliuso, J.D. New Particulate Solids Pneumatic Feeding Device with Mass Flowrate Control. *Powder Technology*, v. 79, p. 265-268, 1994

- Pugsley, T.S., Milne, B.J., Berruti, F. An Innovative Non-Mechanical Solids Feeder for High solids Mass Fluxes in Circulating Fluidized Bed Rises. *Powder Technology*, v. 88, p. 123-131, 1996
- Roberts, A.W. Predicting the Volumetric and Torque Characteristics of Screw Feeders. *Bulk Solids Handling*, v. 16, n. 2, p. 233-244, Apr-Jun 1996
- Sankar, S. R., Smith, T.N. Slip Velocities in Pneumatic Transport – Part II. *Powder Technology*, v. 47, n 2 , p. 179-194, Jul. 1986
- Sarkar, M., Gupta, S.K., Sarkar, M.K. An Experimental Investigation of the Flow of Solids from a Fluidized-Bed through an Inclined Pipe. *Powder Technology*, v. 64, n. 3, p. 221-231, Feb. 1991a
- Sarkar, M., Gupta, S.K., Sarkar, M.K. Experimental Investigation on Gravity Flow of Solids through Inclined Pipes. *Chemical Engineering Science*, v. 46, n. 4, p. 1137-1144, 1991b
- Sarkar, M., Gupta, S.K., Sarkar, M.K. Experimental Investigation of Solids Flow from Aerated Beds through Inclined Pipes. *Transactions of Institution of Chemical Engineers*, v. 69, part A, p. 361-368, Sep. 1991c
- Scheibe, M, Höhne, D., Husemann, K. The Feed Characteristic of a Rotary Valves in a Hopper Feeder System. *Powder Handling & Processing*, v. 9, n. 1, p. 13-20, Jan-Mar. 1997
- Schlesinger, D, Israel, A.P. Screw Conveyer Calculation Based on Actual Material Properties *Powder Handling & Processing*, v. 9, n. 4, p. 321-325, Oct-Dec. 1997
- Spivakovsky, Dyachkov. *Conveyors and Related Equipament*. Ed. Peca Publishers - Moscou - USSR.
- Warex Valve GmbH Butterfly Valves for Bulk Materials Handling. *Bulk Solids Handling*, v. 18, n. 2, p. 296-297, Apr/Jun. 1998

- Wypych, P.W. Pneumatic conveying of Powders Over Long Distances and at Large Capacities. *Powder Technology*, v. 104, n. 3, p. 278-286, Oct.1999
- Yang, W.C., Knowlton, T.M. L-Valve Equations. *Powder Technology*, v. 77, n. 1, p. 49-54, Oct. 1993
- Yu, Y., Arnold, P.C. Theoretical and Experimental Study on the Volumetric Efficiency of Screw Feeders. *Powder Handling & Processing*, v. 8, n. 3, p. 207-214, Jul-Sep. 1996
- Yu, Y., Arnold, P.C. On Hooper Geometry Interfacing with a Screw Feeder to Achieve Uniform Draw-Down Performance. *Powder Handling & Processing*, v. 8, n. 4, p. 321-328, Oct-Dec. 1996.

Anexo I

Distribuição Granulométrica

Os dados coletados para a distribuição granulométrica, segundo a metodologia descrita no subitem 3.3.1, são apresentados na Tabela I.1.

Tabela I.1 - Dados da distribuição granulométrica

Peneira (mm)	Massa retida (g)	
0,590	-x-x-	0
0,420	0	128,50
0,355	20,00	218,80
0,297	188,00	105,50
0,210	338,50	189,50
0,177	139,50	102,40
0,149	77,50	42,40
0,125	21,70	-x-x-
0,105	8,40	-x-x-
0,088	2,10	-x-x-
fundo	0	9,30

onde

-x-x- peneira não utilizada

Anexo II

Planilha para Cálculo dos Efeitos dos Fatores e das Interações

Matriz de Planejamento em Dois Níveis

Exper.	Fatores				Respostas			
	Ao/At	ΔPv	dp	TL	Ms [kg/h]			
	[1]	[2]	[3]	[4]	1º	2º	Média	Variância
1	-	-	-	-	18	14,4	16,2	6,48
2	+	-	-	-	396	403,2	399,6	25,92
3	-	+	-	-	21,6	18	19,8	6,48
4	+	+	-	-	658,8	633,6	646,2	317,52
5	-	-	+	-	18	21,6	19,8	6,48
6	+	-	+	-	352,8	331,2	342	233,28
7	-	+	+	-	21,6	25,2	23,4	6,48
8	+	+	+	-	633,6	640,8	637,2	25,92
9	-	-	-	+	79,2	97,2	88,2	162
10	+	-	-	+	338,4	403,2	370,8	2099,52
11	-	+	-	+	126	129,6	127,8	6,48
12	+	+	-	+	518,4	453,6	486	2099,52
13	-	-	+	+	122,4	118,8	120,6	6,48
14	+	-	+	+	288	309,6	298,8	233,28
15	-	+	+	+	151,2	162	156,6	58,32
16	+	+	+	+	460,8	489,6	475,2	414,72
							Var. Exp.	356,81
							Erro	6,678
							Conf: 95% e v: 16	14,16

Cálculo dos efeitos sobre a descarga - Fatores Principais

	1	2	3	4		Ao/At	ΔPv	dp	TL
	Ao/At	ΔPv	dp	TL	Descarga	1	2	3	4
1	-1	-1	-1	-1	16,2	-16,2	-16,2	-16,2	-16,2
2	1	-1	-1	-1	399,6	399,6	-399,6	-399,6	-399,6
3	-1	1	-1	-1	19,8	-19,8	19,8	-19,8	-19,8
4	1	1	-1	-1	646,2	646,2	646,2	-646,2	-646,2
5	-1	-1	1	-1	19,8	-19,8	-19,8	19,8	-19,8
6	1	-1	1	-1	342,0	342	-342	342	-342
7	-1	1	1	-1	23,4	-23,4	23,4	23,4	-23,4
8	1	1	1	-1	637,2	637,2	637,2	637,2	-637,2
9	-1	-1	-1	1	88,2	-88,2	-88,2	-88,2	88,2
10	1	-1	-1	1	370,8	370,8	-370,8	-370,8	370,8
11	-1	1	-1	1	127,8	-127,8	127,8	-127,8	127,8
12	1	1	-1	1	486,0	486	486	-486	486
13	-1	-1	1	1	120,6	-120,6	-120,6	120,6	120,6
14	1	-1	1	1	298,8	298,8	-298,8	298,8	298,8
15	-1	1	1	1	156,6	-156,6	156,6	156,6	156,6
16	1	1	1	1	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2
						385,43	114,53	-10,13	2,48

Cálculo dos efeitos sobre a descarga - Interações dos Fatores Principais

12	13	14	23	24	34	123	124	134	234	1234
16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	-16,2	-16,2	-16,2	-16,2	16,2
-399,6	-399,6	-399,6	399,6	399,6	399,6	399,6	399,6	399,6	-399,6	-399,6
-19,8	19,8	19,8	-19,8	-19,8	19,8	19,8	19,8	-19,8	19,8	-19,8
646,2	-646,2	-646,2	-646,2	-646,2	646,2	-646,2	-646,2	646,2	646,2	646,2
19,8	-19,8	19,8	-19,8	19,8	-19,8	19,8	-19,8	19,8	19,8	-19,8
-342	342	-342	-342	342	-342	-342	342	-342	342	342
-23,4	-23,4	23,4	23,4	-23,4	-23,4	-23,4	23,4	23,4	-23,4	23,4
637,2	637,2	-637,2	637,2	-637,2	-637,2	637,2	-637,2	-637,2	-637,2	-637,2
88,2	88,2	-88,2	88,2	-88,2	-88,2	-88,2	88,2	88,2	88,2	-88,2
-370,8	-370,8	370,8	370,8	-370,8	-370,8	370,8	-370,8	-370,8	370,8	370,8
-127,8	127,8	-127,8	-127,8	127,8	-127,8	127,8	-127,8	127,8	-127,8	127,8
486	-486	486	-486	486	-486	-486	486	-486	-486	-486
120,6	-120,6	-120,6	-120,6	-120,6	120,6	120,6	120,6	-120,6	-120,6	120,6
-298,8	298,8	298,8	-298,8	-298,8	298,8	-298,8	-298,8	298,8	-298,8	-298,8
-156,6	-156,6	-156,6	156,6	156,6	156,6	-156,6	-156,6	-156,6	156,6	-156,6
475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2	475,2
93,83	-27,23	-101,03	13,28	-22,73	4,73	14,18	-39,83	-8,78	1,13	2,02

Anexo III

Análise da Incerteza Experimental

O cálculo da incerteza experimental na determinação da descarga de sólidos através da válvula foi realizado segundo Holman (1994). A descarga de sólidos é determinada por:

$$\dot{M}_s = \frac{M_s}{t} \quad (\text{II.1})$$

Logo, o cálculo do erro relativo no cálculo de \dot{M}_s é obtido por:

$$w_{\dot{M}_s} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \dot{M}_s}{\partial M_s} \right) w_{M_s} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial \dot{M}_s}{\partial t} \right) w_t \right]^2} \quad (\text{II.2})$$

onde,

$$\frac{\partial \dot{M}_s}{\partial M_s} = \frac{1}{t} \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{\partial \dot{M}_s}{\partial t} = \frac{-M_s}{t^2} \quad (\text{II.4})$$

sendo que

$$w_{ms} = \pm 2 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$w_t = \pm 0,2 \text{ s}$$

$$w_{\dot{M}_s} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{t}\right)2 \times 10^{-2}\right]^2 + \left[\left(\frac{-M_s}{t^2}\right)5,56 \times 10^{-3}\right]^2} \quad [\text{kg/h}] \quad (\text{II.5})$$

Nos testes realizados neste trabalho a incerteza experimental no cálculo da descarga de sólidos particulados variou entre 0,32 e 12,92 kg/h.

Anexo IV

TABLE 3.7
Values of Student's t for use in Equation (3.44)
 Subscript designates percent confidence level.

Degrees of freedom v	t_{50}	t_{80}	t_{90}	t_{95}	t_{98}	t_{99}	$t_{99.9}$
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291