

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Injeção de Partículas de FCC usando  
Injetores Gás-Sólido tipo Venturi**

Autor: **Rogério Bolchi Domingues**  
Orientador: **Leonardo Goldstein Jr.**

25/2006

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

D714i Domingues, Rogério Bolchi  
Injeção de partículas de FCC usando injetores gás-sólido tipo Venturi / Rogério Bolchi Domingues. --  
Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Leonardo Goldstein Junior  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Transporte por tubo pneumático. 2. escoamento  
bifásico. I. Goldstein Junior, Rogério. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Injection of FCC particles through a Venturi injector feeder

Palavras-chave em Inglês: Pneumatic – tube transportation, Two-phase flow

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Sílvia Azucena Nebra Pérez e José Renato Coury.

Data da defesa: 23/02/2006.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

# **Injeção de Partículas de FCC usando Injetores Gás-Sólido tipo Venturi**

**Autor: Rogério Bolchi Domingues**  
**Orientador: Leonardo Goldstein Jr.**

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Térmica e Fluídos

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

Campinas, 2006  
S.P. – Brasil

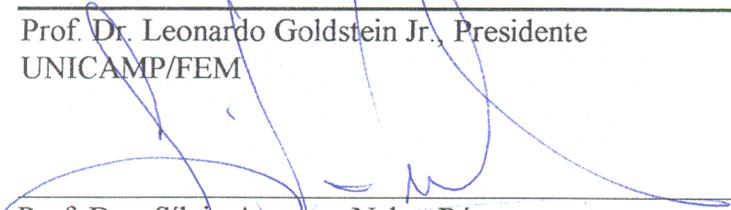
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS

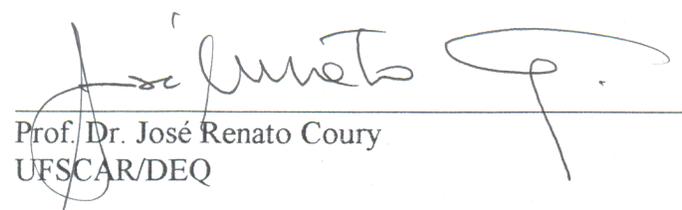
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

# Injeção de Partículas de FCC usando Injetores Gás-Sólido tipo Venturi

Autor: Rogério Bolchi Domingues  
Orientador: Leonardo Goldstein Junior

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., Presidente  
UNICAMP/FEM

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Sílvia Azucena Nebra Pérez  
UNICAMP/FEM

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Renato Coury  
UFSCAR/DEQ

Campinas, 23 de fevereiro de 2006.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais, Antonio e Noemia, como uma forma de expressar todo amor e gratidão que sinto por tudo que fizeram por mim.

A minha querida esposa Patrícia, que em todos os momentos esteve ao meu lado demonstrando seu amor e dedicação durante a execução deste trabalho.

A Anselmo, Lucília e Rubens, por incentivarem meus estudos, pela amizade e companheirismo e por estarem presentes em momentos importantes da minha vida.

E a todas as pessoas que caminharam ao meu lado, que me apoiaram e deram condições para que este trabalho fosse realizado.

## **Agradecimentos**

A Deus, por toda sua criação, a maior fonte de inspiração.

Ao Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., por ter acreditado neste tema orientando-me brilhantemente e por ter contribuído eficazmente na elaboração e conclusão deste trabalho. Também por tudo o que me ensinou e por sua grande amizade.

Aos colegas de departamento Emerson Reis, Julio Dainezi, Jhon Ramirez, Giovanilton Ferreira e Fábio Fassani pela colaboração e amizade durante a execução deste trabalho.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao CNPq e à Faculdade de Engenharia Mecânica por terem ofertado as instalações para a realização deste trabalho.

*A simplicidade é a essência da genialidade humana.*

## Resumo

DOMINGUES, Rogério Bolchi, *Injeção de Partículas de FCC usando um injetor gás-sólido tipo Venturi*, Campinas; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 100 p. Dissertação (Mestrado)

Os injetores gás-sólido tipo Venturi são equipamentos utilizados na indústria para transportar materiais particulados. Eles constituem um equipamento de baixo custo e de construção simples, que não possui componentes móveis. No entanto promovem um alto consumo energético. A literatura existente apresenta informações sobre o comportamento deste equipamento na injeção de alguns materiais, tais como, areia, cimento, esferas de vidro, polietileno e trigo. Neste trabalho será testado um catalisador de FCC. A introdução de coeficientes de perda de pressão em um modelo mecanicista proposto por Bohnet e Wagenknecht (1978) tornou as equações obtidas similares às equações clássicas de perda de pressão em dutos. Os testes forneceram dados sobre a distribuição de pressão no injetor, incluindo na câmara de abastecimento, em função da descarga de gás. Foi verificado o efeito da carga de sólidos na distribuição de pressão ao longo do injetor. E por fim foi verificado o comportamento da distribuição de pressão ao longo do injetor e a variação dos coeficientes de perda de pressão em função da variação dos parâmetros geométricos  $S$  e  $d_{G2}$ . Após coletados os dados foi apresentado uma proposta de um procedimento para o dimensionamento de injetores gás-sólidos tipo Venturi.

### *Palavras Chave*

Injetor Gás-Sólido, Transporte Pneumático, escoamento Gás-Sólido.

## **Abstract**

DOMINGUES, Rogério Bolchi, *Injection of FCC Particles Through a Venturi Injector Feeder*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 100 p. Dissertação (Mestrado).

Gas-solid Venturi injectors are used in industry as feeding devices of granulated or pulverized solids into pipelines under pressure for pneumatic conveying. Their advantages are no moving parts, low cost and a simple geometry. On the other hand they have a large energy consumption. Not much work has been reported in the literature on Venturi injectors. Information is available for sand, cement, glass, polyethylene and wheat. Energy conversion efficiencies were introduced in Bohnet and Wagenknecht (1978) equations to evaluate the pressure drop distribution. In this work FCC particulate was injected and measurements were performed to obtain an alternative parameter – the pressure drop coefficients – which allows calculating the total pressure variation in the injector, including the hopper. The solids loading influence on the pressure variation was studied, as well as the influence of the inlet air nozzle diameter, and of the distance between this nozzle and the Venturi entrance section. A procedure to estimate a gas-solids injector was proposed.

### *Keywords*

Gas-Solid Injector, Pneumatic Conveying, Gas-Solid Flows

# Índice

Lista de Figuras		iv
Lista de Tabelas		vi
Nomenclatura		vii
<b>Capítulo 1</b>	<b>Introdução</b>	1
	1.1 Injetor de Particulado Sólido com Venturi	1
	1.2 Considerações Acerca da Operação de um Injetor de Sólidos com Venturi	3
	1.3 Motivação à Pesquisa	5
	1.4 Objetivos do Trabalho	6
<b>Capítulo 2</b>	<b>Estado da Arte</b>	7
	2.1 Introdução	7
	2.2 Revisão da Literatura	7
<b>Capítulo 3</b>	<b>Escoamento Gás-Sólido no Injetor</b>	13
	3.1 Introdução	13
	3.2 Equações Fundamentais do Escoamento	14
	3.3 Distribuição de Pressão nas Singularidades do Injetor	16
	3.3.1 Distribuição de Pressão no Tubo de Entrada de Gás	17
	3.3.2 Distribuição de Pressão na Câmara de Abastecimento	18
	3.3.3 Distribuição de Pressão no Tubo de Mistura	25
	3.3.4 Distribuição de Pressão no Difusor	29

3.4	Velocidades da Partícula	31
3.4.1	Velocidade de Saltação	31
3.4.2	Velocidade de Transporte	32
3.5	Determinação da Potência Consumida Pelo Injetor	32
<b>Capítulo 4</b>	<b>Descrição da Bancada e Procedimento Experimental</b>	<b>34</b>
4.1	Introdução	34
4.2	Descrição da Bancada Experimental	34
4.2.1	Fluxograma da Instalação	34
4.2.2	O Injetor	37
4.2.3	Sistema de Aquisição de Dados	38
4.3	Material Sólido Injetado	39
4.4	Programa de Testes	40
4.5	Procedimento Experimental	41
4.5.1	Partida	41
4.5.2	Verificação do Sistema de Aquisição de Sinais	42
4.5.3	Ajuste da Descarga de Partículas e de Ar	42
4.5.4	Tomadas de Pressão	43
4.6	Redução dos Dados	43
4.6.1	Redução dos Dados Experimentais Obtidos	43
4.6.2	Redução dos Dados Experimentais apresentados por Bohnet (1985)	46
<b>Capítulo 5</b>	<b>Apresentação e Discussão dos Resultados</b>	
5.1	Distribuição de Pressão no Injetor	48
5.1.1	Escoamento de Ar	48
5.1.2	Escoamento da Mistura Ar – FCC	49
A.	Distribuição de Pressão ao Longo do Injetor	49
B.	Distribuição de Pressão na Câmara de Abastecimento	51
C.	Incorporando o Injetor em um Sistema de Transporte	52
D.	Efeito da Carga de Sólidos na Distribuição de Pressão	54
5.2	Efeito da Geometria do Injetor na Distribuição de Pressão	57

5.2.1 Efeito do Diâmetro do Bocal de Entrada de Ar	58
5.2.2 Efeito da Posição do Bocal de Entrada de Ar	64
5.2 Coeficiente de Perda de Pressão	64
<b>Capítulo 6 Procedimento de Projeto de um Injetor</b>	<b>69</b>
<b>Capítulo 7 Conclusões e Recomendações</b>	
7.1 Distribuição de Pressão no Injetor	81
7.2 Efeito da Geometria do Injetor na Distribuição de Pressão	81
7.3 Coeficiente de Perda de Pressão	82
7.4 Projeto de um Injetor	83
7.5 Recomendações	83
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>84</b>
<b>Apêndice A</b>	<b>86</b>
<b>Apêndice B</b>	<b>91</b>
<b>Apêndice C</b>	<b>97</b>
<b>Apêndice D</b>	<b>102</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Configuração de um Injetor tipo Venturi	1
Figura 1.2 - Dois tipos de injetores de sólidos. (a) Injetor tipo “T”, (b) Injetor tipo Venturi	2
Figura 1.3 – Distribuição de Pressão de Gás em um Injetor tipo “T”	3
Figura 1.4 – Distribuição de Pressão de Gás em um Injetor tipo Venturi com Bocal de Entrada do Gás de Transporte	4
Figura 3.1 - Injetor utilizado na aplicação das equações fundamentais	17
Figura 4.1 – Fluxograma da Instalação	37
Figura 4.2 – Desenho Esquemático do Injetor – IJ1	38
Figura 4.3 - Vista do Injetor de Particulado Sólido	38
Figura 4.4 - Sistema de Válvulas para medição de Pressão ao Longo do Injetor	39
Figura 4.5 – Distribuição Granulométrica	41
Figura 5.1 – Distribuição de Pressão do Gás dentro do Injetor, $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	50
Figura 5.2 – Distribuição de Pressão da Mistura Gás-FCC no injetor, $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	51
Figura 5.3 – Distribuição de Pressão na Câmara de Abastecimento, $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	53
Figura 5.4 – Diferença de Pressão no Injetor versus Descargas de Ar e FCC, $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	54
Figura 5.5 – Distribuição de Pressão no Injetor com $\varphi = 0,773$ , $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	55
Figura 5.6 – Distribuição de Pressão no Injetor com $\varphi = 1,19$ , $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	56
Figura 5.7 – Distribuição de Pressão no Injetor com $\varphi = 1,52$ , $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	56

Figura 5.8 – Distribuição de Pressão no Injetor com $\varphi = 1,77$ , $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	57
Figura 5.9 – Distribuição de Pressão no Injetor com $\varphi = 2,15$ , $d_2 = 20,40mm$ e $S = 50,0mm$	57
Figura 5.10 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para $d_2 = 12,64mm$ e $S$ variável	59
Figura 5.11 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para $d_2 = 15,98mm$ e $S$ variável	60
Figura 5.12 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para $d_2 = 20,40mm$ e $S$ variável	61
Figura 5.13 – Variação de Pressão da Mistura ao Longo do Injetor para $d_2 = 12,64$ mm e $S$ variável	62
Figura 5.14 – Variação de Pressão da Mistura ao Longo do Injetor para $d_2 = 15,98$ mm e $S$ variável	63
Figura 5.15 – Variação de Pressão da Mistura ao Longo do Injetor para $d_2 = 20,40$ mm e $S$ variável	64
Figura 5.16 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos $\varphi$ para $d_2 = 12,64mm$	66
Figura 5.17 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos $\varphi$ para $d_2 = 15,98$ mm	67
Figura 5.18 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos $\varphi$ para $d_2 = 20,40$ mm	67
Figura 5.19 – Coeficientes de Perda de Pressão $K_{24}$ , $K_{45}$ e $K_{57}$ para $d_2 = 20,40mm$	68
Figura 5.20 – Coeficientes de Perda de Pressão $K_{24}$ , $K_{45}$ e $K_{57}$ para o FCC em função de $d_2$	69
Figura A.1 – Curva de Calibração do Transdutor de Pressão	88
Figura A.2 – Curva de Calibração da Balança Toledo	88

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1 Distribuição Granulométrica do Particulado	41
Tabela 4.2 Ensaio com a Mistura Ar + FCC	42
Tabela 4.3 Ensaio com Ar	43
Tabela 5.1 Diferença de Pressão nas Partes do Injetor em Função de $S$ e $d_2$ para o Ar	58
Tabela 5.2 Número de Mach em $d_2$	59
Tabela D.1 Valores obtidos para $K_{24}$ , $K_{45}$ e $K_{57}$ em função dos parâmetros geométricos $S$ e $d_2$	98
Tabela D.2 Dados reduzidos dos testes para comparação com os dados de Bohnet (1978, 1985), Michon e Bouard (1997) e Chellappan e Ramaiyam (1986)	99
Tabela D.3 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor - $d_2 = 12,64mm$	100
Tabela D.4 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor - $d_2 = 15,98mm$	101
Tabela D.5 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor - $d_2 = 20,40mm$	102

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$c$ : velocidade do som	[m/s]
$d_p$ : diâmetro das partículas	[m]
$d_n$ : diâmetro das diferentes secções do injetor	[m]
$d_{G24}$ : diâmetro médio do escoamento da mistura na câmara de abastecimento	[m]
$d_{G45}$ : diâmetro médio do escoamento da mistura no tubo de mistura	[m]
$e_{Gi}$ : energia total contida no escoamento de gás em diferentes pontos do injetor	[kJ/kg]
$e_{pi}$ : energia total contida na partícula em diferentes pontos do injetor	[kJ/kg]
$f_p^*$ : fator experimental de atrito entre as partículas e a parede do injetor	[adimensional]
$f_{p45}$ : fator de atrito devido do escoamento das partículas no tubo de mistura	[adimensional]
$f_{G45}$ : fator de atrito de Blasius do escoamento médio do gás no tubo de mistura	[adimensional]
$Fr_{G45}$ : número de Froude do escoamento médio do gás no tubo de mistura	[adimensional]
$g$ : aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{Gn}$ : entalpia contida no escoamento de gás em diferentes pontos do injetor	[kJ/kg]
$h_{li}$ : perda de energia devido às irreversibilidades contidas no escoamento de gás	[Pa]
$K_{12}$ : coeficiente de perda de pressão na entrada de gás	[adimensional]
$K_{24}$ : coeficiente de perda de pressão na câmara de abastecimento	[adimensional]
$K_{45}$ : coeficiente de perda de pressão no tubo de mistura	[adimensional]
$K_{57}$ : coeficiente de perda de pressão no difusor	[adimensional]

$L_j$ : distância entre os pontos do injetor	[m]
$L/d$ : razão entre comprimento e diâmetro do tubo de mistura	[adimensional]
$\dot{M}_p$ : descarga de partículas	[kg/s]
$m_p$ : massa da partícula	[kg]
$\dot{M}_{GT}$ : descarga total de gás	[kg/s]
$\dot{M}_{Gi}$ : descarga de gás em diferentes pontos do injetor	[kg/s]
$\dot{M}_{GS}$ : descarga de gás proveniente do silo	[kg/s]
$Mach$ : Mach do escoamento de gás em $d_2$	[adimensional]
$Pot$ : potência consumida pelo compressor	[W]
$p_{Gn}$ : pressão estática em diferentes pontos do injetor	[Pa]
$p_{A_n}$ : pressão estática gerada pelo atrito da mistura com as paredes do injetor	[Pa]
$p_p$ : pressão estática gerada pelo escoamento das partículas	[Pa]
$p_{GS}$ : pressão estática do gás que escoou junto com os sólidos	[Pa]
$p_{atm}$ : pressão atmosférica	[Pa]
$Q_{Gi}$ : vazão de gás em diferentes pontos do injetor	[m <sup>3</sup> /s]
$Re_{G24}$ : Reynolds do escoamento médio de gás na câmara de abastecimento	[adimensional]
$Re_{G45}$ : Reynolds do escoamento médio de gás no tubo de mistura	[adimensional]
$R$ : constante do gás	[adimensional]
$S$ : distância entre a entrada de gás e a entrada do bocal convergente	[m]
$t$ : tempo de percurso das partículas	[s]
$u_{pn}$ : velocidade das partículas em diferentes pontos do injetor	[m/s]
$u_{Gn}$ : velocidade do gás nas diferentes pontos do injetor	[m/s]
$u_{G24}$ : velocidade média do gás na câmara de abastecimento	[m/s]
$u_{G45}$ : velocidade média do gás no tubo de mistura	[m/s]
$u_s$ : velocidade de saltação da partícula	[m/s]
$l$ : comprimento em diferentes pontos ao longo do injetor	[m/s]

$z_n$  : cota em diferentes pontos do injetor em relação ao eixo de simetria. [m]  
 $\dot{W}$  : potência consumida pelo injetor [W]

### *Letras Gregas*

$\alpha_n$  : coeficiente de energia cinética em diferentes pontos do injetor [adimensional]  
 $\beta$  : coeficiente de resistência gravitacional [adimensional]  
 $\Delta p_G$  : diferença de pressão no escoamento de gás [Pa]  
 $\Delta p_{GS}$  : diferença de pressão no escoamento de gás devido a aceleração do gás vindo do silo [Pa]  
 $\Delta p_P$  : diferença de pressão no escoamento de gás devido a aceleração do particulado [Pa]  
 $\Delta p_A$  : diferença de pressão no escoamento de gás devido ao atrito da mistura [Pa]  
 $\eta_{24}$  : coeficiente de transformação de energia na câmara de abastecimento [adimensional]  
 $\eta_{45}$  : coeficiente de transformação de energia no tubo de mistura [adimensional]  
 $\eta_{57}$  : coeficiente de transformação de energia no difusor [adimensional]  
 $\mu$  : viscosidade cinética do gás [Ns/m<sup>2</sup>]  
 $\rho_{Gn}$  : densidade do gás em diferentes pontos do injetor [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{G24}$  : densidade média do gás na câmara de abastecimento [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{G45}$  : densidade média do gás no tubo de mistura [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{G57}$  : densidade média do gás no difusor [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{PA}$  : densidade aparente do particulado [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_P$  : densidade absoluta do particulado [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{PB}$  : densidade bulk do particulado [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\phi$  : esfericidade do particulado [adimensional]  
 $\varphi$  : carga de sólidos [adimensional]

## *Subscritos*

*n* : refere-se aos diferentes pontos do injetor entre 1 e 7.

*i* : refere-se às regiões do injetor, (24) câmara de abastecimento, (45) tubo de mistura e (57) difusor

## *Abreviações*

CP1 - Soprador tipo “*Roots*”

CP2 - Compressor

VFD1 - Válvula de desvio tipo gaveta

VFD2 - Válvula de desvio tipo gaveta

VR1 - Válvula de estrangulamento tipo gaveta

VR2 - Válvula de estrangulamento tipo gaveta

SL1 - Silo de abastecimento de FCC

SL2 - Silo para a coleta de sólidos separados pelo ciclone

IJ1 - Injetor de Sólido tipo venturi

CL1 - Ciclone

FP1 - Filtro de tecido para a coleta de sólidos na saída de ar do ciclone

BI1 - Bocal com  $d_2 = 12,64\text{ mm}$

BI2 - Bocal com  $d_2 = 15,98\text{ mm}$

BI3 - Bocal com  $d_2 = 20,40\text{ mm}$

MU1 - Placa de Orifício

TE1 - Termopares IOPE tipo K

TD1 - Transdutor de pressão SMAR LD301

VG - Válvulas ligadas ao “*manifold*”

VS3 - Válvula tipo agulha para entrada de ar em SL1

RT1 - Rotâmetro

FCC - Fluid Cracker Catalyser

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Injetor de Particulado Sólido com Venturi

Os injetores gás-sólido são equipamentos utilizados no transporte de materiais particulados a curtas e longas distâncias, em indústrias químicas, alimentícias, de minério, petrolíferas, entre outras. Eles têm baixo custo e são de construção geométrica simples, conforme mostra a Figura 1.1.

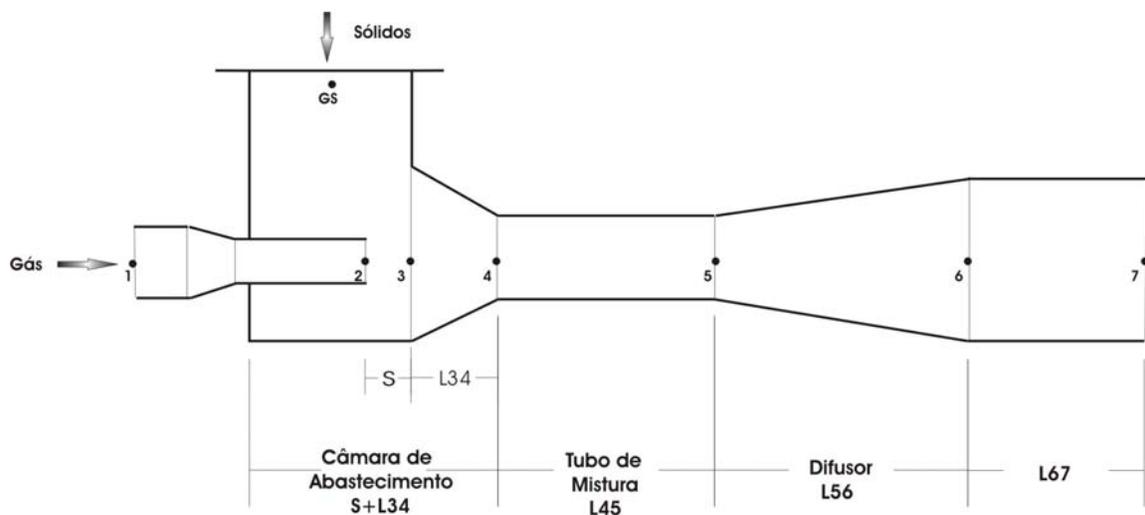


Figura 1.1 - Configuração de um Injetor tipo Venturi

Os índices subscritos *12*, *24*, *45* e *57* são utilizados ao longo deste trabalho para definir as regiões do injetor, que são, respectivamente, o bocal de entrada de gás, a câmara de abastecimento, o tubo de mistura, e o difusor mais o tubo adjunto de comprimento  $L_{57}$ .

Em transporte pneumático são empregados dois tipos básicos de injetores. O primeiro é constituído apenas por um “T”, em que o particulado é dosado por uma rosca transportadora, como é mostrado na Figura 1.2a. Neste caso a injeção do particulado ocorre por dois efeitos: o da gravidade, que promove a entrada do particulado na tubulação, e o arraste que o fluido exerce sobre o particulado, transportando-o. Com este tipo de injetor, a descarga de sólidos apenas é controlada pela variação da rotação do dosador helicoidal. As desvantagens neste tipo de injetor são: a presença de peças móveis, que se desgastam e as instabilidades da alimentação do particulado devido à contrapressão causada pela pressão da linha de transporte que é superior a pressão da região do dosador helicoidal. .

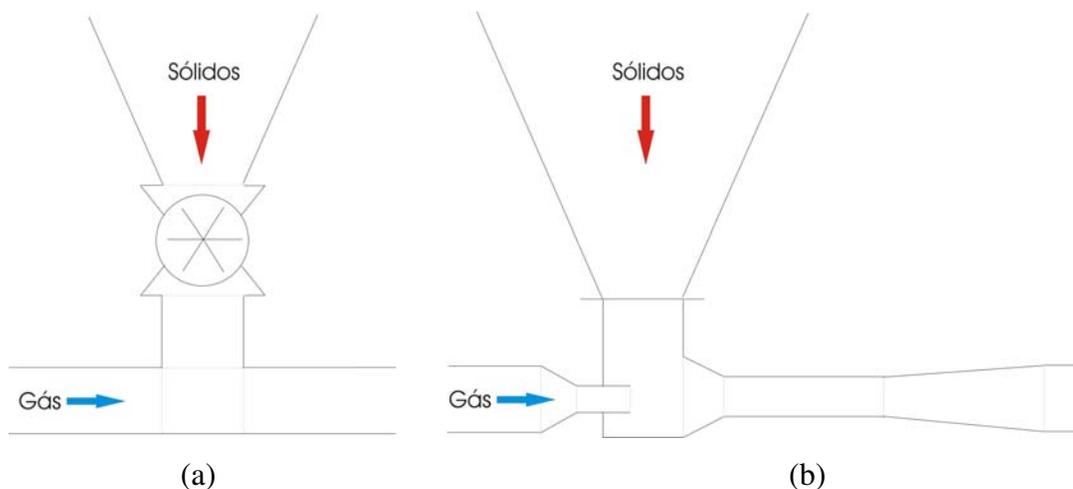


Figura 1.2 - Dois tipos de injetores de sólidos. (a) Injetor tipo “T”, (b) Injetor tipo Venturi.

Alternativamente, pode-se utilizar injetores do tipo Venturi, em que há a retirada do dosador helicoidal, a adição de um Venturi a jusante da câmara de abastecimento e a adição de um bocal convergente a montante da câmara de abastecimento, conforme é mostrado na Figura 1.2b.

A adição do Venturi causa uma condição favorável para que a energia cinética do gás de transporte seja transferida ao particulado sólido, e reduz o problema de contrapressão sobre a alimentação do particulado que desce do silo por diminuir a pressão na câmara de abastecimento.

Outra vantagem é a alta turbulência gerada, que possibilita uma mistura gás-sólido melhor distribuída na secção transversal do equipamento, evitando acúmulo de sólidos no tubo, o que não acontece com os injetores do tipo “T”, especialmente se o particulado for de alta densidade.

O injetor tipo Venturi não possui componente móvel e, por este motivo, tem menor frequência de manutenção. A desvantagem deste equipamento, segundo Bohnet (1985) é o maior consumo energético, devido à queda de pressão que o tipo de equipamento impõe no sistema.

## 1.2 Considerações Acerca da Operação de um Injetor de Sólidos com Venturi

Inicialmente será considerado o comportamento fluidodinâmico dos injetores operando somente com gás, observando-se que neste trabalho o escoamento será tratado como incompressível.

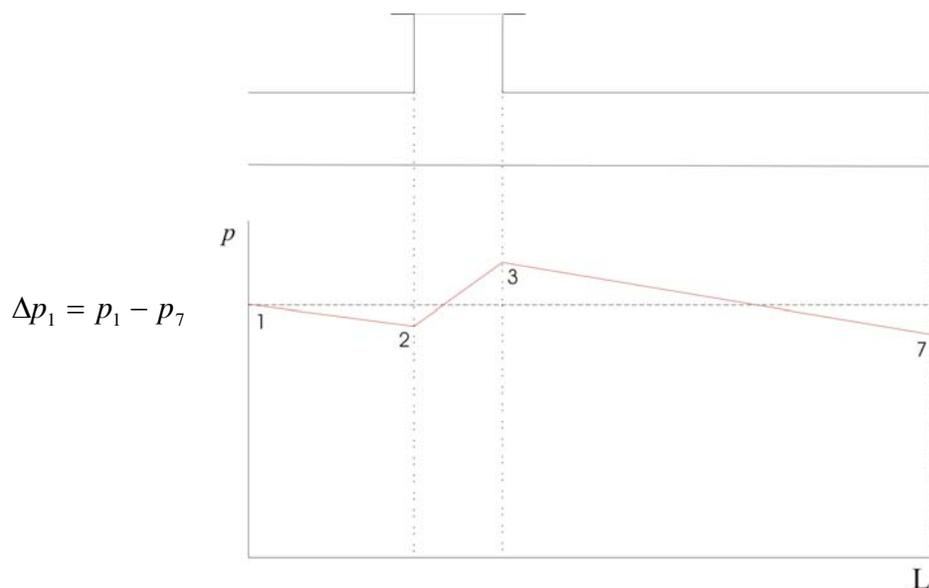


Figura 1.3 – Distribuição de Pressão de Gás em um Injetor tipo “T”.

A Figura 1.3 mostra de forma esquemática uma curva típica da distribuição de pressão do gás ao longo de um injetor tipo “T”. O gás perde pressão devido às irreversibilidades ao longo do dispositivo, e recupera pressão ao encontrar a expansão correspondente ao T, numa perda total de pressão  $\Delta p_1$ .

Ao inserir um Venturi após a câmara de abastecimento do particulado, a distribuição de pressão do gás fica como esquematizada na Figura 1.4. Comparativamente com a curva do injetor sem o Venturi a queda total de pressão é maior.

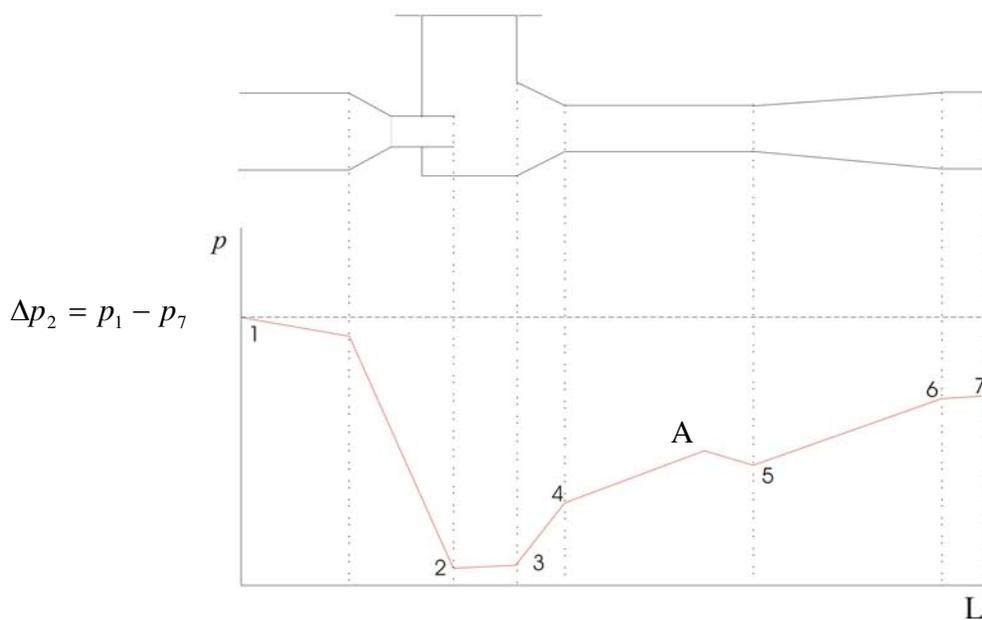


Figura 1.4 – Distribuição de Pressão de Gás em um Injetor tipo Venturi com Bocal de Entrada do Gás de Transporte.

Neste tipo de construção o diâmetro de entrada do gás é menor que o diâmetro do tubo de mistura. Esta configuração cria um jato livre de gás, que escoia dentro do Venturi, expandindo-se sem tocar na parede e, conseqüentemente, sem sofrer perdas por atrito. Devido a isto, há uma recuperação de pressão dentro do Venturi até que o jato toque a parede no ponto A.

Na câmara de abastecimento, há diminuição da energia cinética contida no gás devido à transferência de quantidade de movimento e a colisão com o sólido particulado. Na região de

entrada do Venturi estabelece-se uma condição favorável para o gás transferir quantidade de movimento e acelerar o particulado. Porém a contrapressão existente imediatamente antes desta aceleração do escoamento gás-sólido, pode bloquear o particulado que desce do silo. O efeito da contrapressão é compensado pela existência do bocal convergente a montante da câmara de abastecimento, que provoca uma depressão. Neste tipo de injetor a perda total de pressão é  $\Delta p_2 > \Delta p_1$ , de modo que o gasto energético no compressor de gás será maior que nos casos anteriores.

Apesar de apresentar uma construção simples, estes injetores acoplam dois fenômenos complexos em escoamentos bifásicos gás-sólido: um escoamento cruzado entre as fases gasosa e sólida seguido de um escoamento bifásico homogêneo através de um Venturi, o que tem dificultado a previsão do comportamento fluidodinâmico da mistura ao longo do injetor. Já há, todavia, a publicação de alguns dados experimentais para areia, esferas de vidro, polietileno e trigo, entre outros. Há, também, uns poucos modelos matemáticos mais recentes que procuram simular a distribuição de pressão dentro do injetor.

### **1.3 Motivação a Pesquisa**

A motivação para a realização deste trabalho foi a necessidade de expandir o conhecimento sobre o comportamento hidrodinâmico da mistura gás-sólido em um injetor tipo Venturi, visando a proposição de um esquema de projeto deste equipamento, complementando a informação disponível na literatura.

O projeto de um injetor, como muitos outros na engenharia, inclui um processo iterativo. Os dados de entrada usuais fornecidos pelo processo são: a descarga de sólidos, as propriedades do sólido que será transportado e o diâmetro da tubulação em que injetor será conectado. O resultado obtido é a geometria do injetor, a perda de pressão e a potência consumida a fim de transportar as partículas.

## 1.4 Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Testar experimentalmente a injeção de partículas sólidas, no caso, partículas de catalisador de FCC, em transporte pneumático, contribuindo para a ampliação da informação restrita disponível na literatura, e
- Propor um procedimento para o projeto de injetores gás-sólido com um Venturi.

## **Capítulo 2**

### **Estado da Arte**

#### **2.1 Introdução**

A bibliografia existente sobre injetores gás-sólido tipo Venturi compreende trabalhos teóricos, numéricos e experimentais. Estudos sobre o escoamento de misturas gás-sólido através de um Venturi tiveram início no final da década de 40 e buscaram determinar a queda de pressão do escoamento gás-sólido e a utilização de Venturis como medidores de vazão. Não se pode, no entanto, desenvolver o estudo de injetores gás-sólido tipo Venturi a partir da informação disponível para o escoamento de misturas gás-sólido através de Venturis, devido às hipóteses adotadas, das quais a principal é que o escoamento bifásico deve estar desenvolvido ao entrar no Venturi para que as correlações de queda de pressão disponíveis para Venturis possam ser empregadas nos injetores tipo Venturi, o que não acontece, pois a mistura se forma na câmara de abastecimento, localizada imediatamente antes do Venturi. O estudo de injetores gás-sólido tipo Venturi, pode-se afirmar, teve início basicamente a partir de Bohnet (1978).

No que diz respeito aos materiais testados pode-se citar: polietileno, cimento, esferas de vidro, areia, trigo e biomassa.

#### **2.2 Revisão da Literatura**

Bohnet e Wagenknecht (1978) estudaram experimentalmente a variação de pressão e da velocidade do escoamento da mistura bifásica em diferentes pontos do injetor, com o objetivo de modelar a hidrodinâmica do escoamento no equipamento. Para determinar a variação de pressão

do gás, fizeram um balanço de energia em cada secção do injetor e para levar em conta o efeito do escoamento dos sólidos aplicaram a equação da quantidade de movimento nas partículas. A variação total de pressão no injetor foi obtida pela soma das duas parcelas, numa abordagem mecanicista. Não foram feitas tomadas na câmara de abastecimento, sendo que para esta região os dados foram extrapolados.

Bohnet e Teifke (1985) determinaram a variação dos coeficientes de transformação de energia cinética em pressão proposto por Bohnet e Wagenknecht (1978) para diferentes tipos de materiais. A maior dificuldade encontrada foi a determinação dos coeficientes de transformação de energia na câmara de abastecimento e no bocal convergente. Os resultados mostraram que o coeficiente de transformação decresce com o aumento do número de Reynolds da mistura nas duas regiões, ou seja, quanto maior for a turbulência da mistura menos eficiente é a recuperação de pressão. Foi também observado que o ângulo de expansão do jato de gás dentro do injetor decresce com o inverso da carga de sólidos. Os testes foram realizados com o injetor operando com gás na faixa  $6 \times 10^4 \leq Re_{G24} \leq 16 \times 10^4$  e  $9 \times 10^4 \leq Re_{G45} \leq 20 \times 10^4$ . Onde  $Re_{G24}$  e  $Re_{G45}$  representam um número de Reynolds médio na região da câmara de abastecimento e do tubo de mistura, respectivamente, a ser definido no Capítulo 3.

Bohnet (1985) reuniu as informações expostas em Bohnet e Wagenknecht (1978) e Bohnet e Teifke (1985) e propôs um roteiro de cálculo de injetores gás-sólido. Ele comparou os resultados obtidos pela aplicação de sua proposição com os dados do seu experimento em que o material particulado injetado foi o polietileno, com  $d_p = 3,0mm$  e  $\rho_p = 918kg/m^3$ , pertencente à classe D da classificação de Geldart (1973). A comparação mostrou que os valores calculados desviaram-se cerca de 20% dos valores observados experimentalmente.

Nos trabalhos acima, por Bohnet e Wagenknecht (1978), Bohnet e Teifke (1985) e Bohnet (1985) foram adotadas as seguintes hipóteses na formulação das equações:

- Escoamento turbulento;
- Escoamento em regime permanente;
- Escoamento incompressível;

- Atrito entre a parede do injetor e a mistura;
- Escoamento gás-sólido diluído.

Chellappan e Ramaiyan (1986) estudaram experimentalmente a influência dos parâmetros geométricos do injetor na carga de sólidos dentro da câmara de abastecimento. Para realizar o experimento com diferentes cargas de sólidos, foi mantida constante a descarga de gás e variada a descarga de sólidos. O único parâmetro geométrico não variado foi o diâmetro de entrada do gás na câmara de abastecimento, de  $10,0\text{mm}$ . A partícula sólida testada foi o trigo, com densidade  $\rho_p = 1328\text{kg/m}^3$  e  $d_p = 3,814\text{mm}$ , pertencente à classe D, e descarga de ar fixada em  $0,0294\text{kg/s}$ . Os resultados apresentados foram:

- Ângulo de abertura do bocal convergente

A carga de sólidos na câmara de abastecimento aumenta com a abertura do ângulo do bocal convergente; a carga de sólidos máxima ocorre quando o ângulo de abertura do bocal convergente aproxima-se de  $30^\circ$ .

- Relação entre comprimento e diâmetro do tubo de mistura

A carga de sólidos inicialmente cresce com a relação  $L_{45}/d_{45}$ . Quando  $L_{45}/d_{45} \geq 9,5$  a carga de sólidos decresce. A carga de sólidos máxima é obtida quando  $L_{45}/d_{45}$  varia dentro da faixa de 7,9 a 9,5.

- Ângulo de abertura do difusor

A carga de sólidos na câmara de abastecimento aumenta com a diminuição do ângulo de abertura do difusor. A carga de sólidos máxima ocorreu quando o ângulo de abertura foi  $4^\circ$ .

- S

À medida que S cresce a carga de sólidos também cresce. Os autores recomendaram S entre 10 e 15 mm para a máxima carga de sólidos.

Em 1991 Kmiec e Leschonski realizaram um estudo numérico sobre a distribuição de pressão em um injetor gás-sólido. Os resultados numéricos para o escoamento de polietileno foram comparados com os dados experimentais de Bohnet e Wagenknecht (1978). Para ajustarem os dados numéricos aos dados experimentais utilizaram coeficientes de transformação de energia obtidos por Bohnet e Teifke (1985). Segundo eles, os coeficientes de transformação de energia são dependentes da velocidade do gás, da carga de sólidos, da geometria do injetor e do tipo de partícula. Foi verificado que a razão entre o diâmetro do tubo de mistura e o diâmetro da entrada do gás não pode exceder a 1,3, caso contrário a recuperação de pressão na saída do injetor é baixa. Também avaliaram como o coeficiente de transformação de energia varia com a velocidade terminal da partícula e o resultado foi uma variação linear entre os dois parâmetros. Eles admitiram, como Bohnet (1985), que a recuperação de pressão no difusor é elevada, isto é,  $\eta_{57} \cong 1$ , o que pode ser atribuído ao fato de que o escoamento da mistura no difusor não adere à parede e a perda de pressão devido à aceleração do particulado ser baixa. Estudaram a variação do ângulo de expansão do jato de gás que entra na câmara de abastecimento quando a carga de sólidos é alterada e verificaram que, o ângulo de abertura do jato diminui com o aumento do inverso da carga de sólidos. Para o escoamento de polietileno com  $d_p = 3mm$  o ângulo deve valer aproximadamente  $4^\circ$ .

Schneider (1996) descreveu como os injetores são utilizados na prática, indicando as dificuldades que podem ocorrer se o injetor for usado de maneira errada, e como estes efeitos podem ser eliminados, do ponto de vista dos operadores. O autor mostra a utilização de injetores em plantas de geração de energia, nos quais o gás utilizado para a injeção de sólidos é o ar. Schneider apresentou uma descrição do funcionamento de um injetor convencional e indicou a necessidade de fluidizar a base da câmara de abastecimento para melhorar o desempenho na injeção de partículas finas.

Michon e Bouard (1997) estudaram experimentalmente a injeção de partículas de polietileno, cimento e vidro, sendo  $\rho_p = 792kg/m^3$  e  $d_p = 3,5mm$  para o polietileno;  $\rho_p = 2500kg/m^3$  e  $d_p = 20\mu m$  para o vidro e  $\rho_p = 3020kg/m^3$  e  $d_p = 15\mu m$  para o cimento – materiais que se enquadram, respectivamente, nas classes D, A e C. As hipóteses usadas para a

modelagem matemática foram as mesmas de Bohnet (1985). Eles determinaram a potência de injeção e definiram um coeficiente global de variação de pressão através da razão entre a diferença de pressão entre dois pontos e a pressão dinâmica do escoamento. Os resultados dos experimentos, com carga de sólidos variando entre de 0 a 10, mostraram que para o polietileno o coeficiente global de variação de pressão permaneceu praticamente constante. Para as partículas de vidro e de cimento o coeficiente decresceu para as mesmas cargas de sólidos. Para os três materiais a potência consumida aumentou com o aumento da descarga de sólidos.

Wang e Wypych (1999) propuseram um modelo matemático para calcular o desempenho de um injetor gás-sólido, utilizando como referência os trabalhos de Bohnet (1978,1985), Chellappan e Ramaiyan (1986), e Kmiec e Leschonski (1991), acima citados. Os autores consideraram o modelo descrito por Bohnet como limitado – embora Bohnet tenha notado uma influência significativa da distância  $S$  no desempenho do injetor ele não incorporou este detalhe na sua modelagem matemática. Os coeficientes de perda de pressão da mistura gás-sólido por atrito foram definidos a partir de coeficientes de perda de pressão monofásicos. Outros dois coeficientes foram definidos, a fim de parametrizar o injetor. Um representado pela razão entre as áreas do tubo de mistura e a entrada de gás,  $m = d_4^2/d_2^2$ , e o outro pelo coeficiente de desempenho do injetor, que é representado por  $h = (\bar{p}_5 - \bar{p}_2)/(\bar{p}_1 - \bar{p}_2)$  onde  $\bar{p}$  é a pressão de estagnação ou pressão máxima, definida em uma seção qualquer do injetor por  $\bar{p} = p + \rho u_G^2/2$  e  $p$ : pressão manométrica dos escoamento do gás [Pa];  $\rho$ : densidade do gás [ $kg/m^3$ ] e  $u_G^2$ : velocidade do gás [m/s].

Hassan e Björn (2000) utilizaram um injetor de vapor para alimentar uma planta de gaseificação de serragem. Para a verificação da fluidodinâmica do injetor utilizaram a proposta de Bohnet (1985). Analisaram o comportamento da distribuição de pressão no injetor operando com serragem e vapor saturado e, depois, vapor superaquecido. A diferença notada entre a injeção de serragem com vapor saturado e superaquecido foi a umidade absorvida pela serragem. A utilização de vapor saturado não se mostrou eficaz, pois a serragem umedecida aderiu às paredes da câmara de abastecimento. Segundo os autores, os resultados do experimento mostraram diferença excessiva entre os valores medidos e os calculados para a injeção de

serragem com vapor superaquecido. É possível que o motivo desta diferença esteja relacionado com a diferença geométrica existente entre o injetor de vapor estudado e o injetor proposto por Bohnet (1978). Ao aplicar o modelo de Bohnet (1985) os autores concluíram que foi superestimada a recuperação de pressão no tubo de mistura por não considerar devidamente o atrito da mistura com sua parede. Além disso, a aceleração das partículas também seria superestimada, porque o atrito das partículas não foi considerado no equacionamento da câmara de abastecimento. Nada mencionaram sobre a utilização dos coeficientes de transformação de energia cinética necessários para a aplicação do modelo de Bohnet (1985).

Xiong, Zhang, e Yuan (2005) realizaram um estudo numérico tridimensional de um injetor gás-sólido com Venturi. O objetivo foi propor um modelo diferencial do fenômeno e discretizá-lo para usar a técnica de diferenças finitas com o método SIMPLE. Propuseram uma nova correlação para o termo fonte, que envolveu a conversão de trabalho mecânico em turbulência e a transferência de energia cinética do gás para o particulado. Para realizar os testes numéricos foi utilizado um particulado com  $\rho_p = 2480 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 2,5 \text{ mm}$ , com o ângulo de abertura do bocal convergente entre  $10^\circ$  e  $35^\circ$ , e  $S = 130 \text{ mm}$ . Os resultados mostraram que a pressão estática manométrica na câmara de abastecimento aumentou de maneira proporcional à abertura do ângulo do bocal convergente, para uma descarga de gás constante. Indicaram que para causar uma boa aceleração do particulado e um aumento da descarga de sólido particulado o ângulo do bocal convergente deveria valer em torno de  $10^\circ$  para o injetor estudado.

## Capítulo 3

### Escoamento Gás – Sólido no Injetor

#### 3.1 Introdução

A formulação das equações utilizadas para prever a variação de pressão do escoamento ao longo do injetor é feita a partir da aplicação dos princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos, isto é, os princípios de Conservação da Massa, de Conservação da Energia – a 1ª Lei da Termodinâmica, e a 2ª lei de Newton – a Equação da Quantidade de Movimento. Como ocorre em todos processos reais, as irreversibilidades que acontecem no escoamento da mistura gás-sólido são determinadas experimentalmente. Foram adotadas as seguintes hipóteses:

1. Escoamento gás-sólido diluído horizontal;
2. Escoamento turbulento do gás;
3. Escoamento em regime permanente;
4. Escoamento incompressível;
5. O particulado é acelerado entre duas secções do escoamento pela descarga de gás média entre as duas secções;
6. Existência de atrito entre a mistura e as paredes do injetor;
7. Ausência de trabalho externo (trabalho de eixo);
8. Ausência de reações químicas;

A hipótese de escoamento diluído apresenta, segundo Soo (1967), duas interpretações. A primeira é que os sólidos perturbam pouco o escoamento gasoso porque a densidade do

particulado é baixa e a descarga de gás na mistura é elevada em relação à descarga de sólidos particulados. Neste caso os efeitos viscosos considerados são apenas os do escoamento gasoso.

Já a segunda interpretação considera que a densidade dos sólidos particulados é alta em relação a densidade do gás, porém a descarga de gás na mistura é superior à descarga de sólidos particulados. Neste caso, como no presente trabalho, considera-se o atrito entre a mistura gás-sólido e a parede do injetor.

A variação total de pressão ao longo do injetor é admitida como composta por três parcelas:

- 1°. Variação de pressão no escoamento gasoso devido à mudança de geometria e ao atrito entre a mistura e a superfície interna da parede do injetor;
- 2°. Variação de pressão no escoamento gasoso devido à quantidade de movimento necessária para acelerar o particulado proveniente do silo;
- 3°. Variação de pressão do escoamento gasoso devido à quantidade de movimento necessária para acelerar o gás proveniente do silo.

### 3.2 Equações Fundamentais do Escoamento

#### *Primeira Lei da Termodinâmica*

Segundo Shames (1973), a forma integral da 1ª Lei da Termodinâmica aplicada a um volume de controle é escrita da seguinte forma:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} + \underbrace{\iint_{s.c.} T \cdot u dA}_{\text{Trabalho de Escoamento}} = \iint_{s.c.} \left( \frac{u^2}{2} + gz + h \right) (\rho u \cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} \left( \frac{u^2}{2} + gz + h \right) (\rho dv) \quad (3.1)$$

onde  $Q$ : calor transferido ao volume de controle [J],  $W$ : trabalho de eixo que atravessa o volume de controle [J],  $T$ : tensor de tensões superficiais ao volume de controle [N/m<sup>2</sup>],  $u$ : velocidade do fluido que atravessa o volume de controle [m/s],  $dA$ : elemento infinitesimal de área [m<sup>2</sup>],  $z$ : cota

[m],  $e$ : energia interna do fluido que atravessa volume de controle [ $J/m^2$ ];  $h$ : entalpia do fluido que atravessa o volume de controle  $\rho$ : densidade do fluido [ $kg/m^3$ ] e  $dv$ : volume infinitesimal [ $m^3$ ].

Decompondo escalarmente a Eq.(3.1) na direção horizontal alinhada ao eixo do injetor e, considerando que o fluido que atravessa a superfície de controle seja normal a ele, que o escoamento seja paralelo, e que a tensão normal à superfície de controle seja igual à pressão termodinâmica, a Equação da Conservação da Energia para um volume de controle:

$$\frac{dQ}{dt} = \iint_{s.c.} \left( \frac{u^2}{2} + gz + e + \frac{p}{\rho} \right) (\rho u \cdot dA) \quad (3.2)$$

onde  $p$  é a pressão termodinâmica [Pa].

Multiplicando a Eq. (3.2) por  $dm/dt$  e integrando no volume de controle chega-se à equação de variação de energia em dutos:

$$\left( \frac{p_1}{\rho_1} + \alpha_1 \frac{u_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho_2} + \alpha_2 \frac{u_2^2}{2} + gz_2 \right) = (e_2 - e_1) - \frac{dQ}{dm} = h_l \quad (3.3)$$

onde  $\alpha_1$ : coeficiente de energia cinética em 1 [adimensional],  $\alpha_2$ : coeficiente de energia cinética em 2 [adimensional],  $dm$ : elemento infinitesimal de massa [kg] e  $h_l$ : fator que leva em conta as irreversibilidades [J/kg] no escoamento.

### ***Segunda Lei de Newton***

Segundo Shames (1973), a forma integral da segunda lei de Newton para um volume de controle pode ser escrita como:

$$F_s + \iiint_{v.c.} B \rho dv = \iint_{s.c.} u (\rho u \cdot dA) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} u (\rho dv) \quad (3.4)$$

onde  $F$  : forças de superfície [N] e  $B$  : forças de campo atuantes sobre o volume de controle [N].

A Eq.(3.4) é vetorial e pode ser decomposta em três eixos ortogonais. Considerando escoamento unidimensional, horizontal e alinhado ao eixo do injetor, e que a direção da gravidade é perpendicular ao eixo do injetor, ela fica

$$\iint_{S.C} -pdA = \iint_{S.C} u \cdot (\rho u \cdot dA) \quad (3.5)$$

onde a força superficial de pressão foi escrita como

$$F_s = \iint_{S.C} -pdA$$

### 3.3 Distribuição de Pressão nas Singularidades do Injetor

Nesta seção as equações fundamentais desenvolvidas no item anterior serão aplicadas a cada parte do injetor. Para isso será útil a Figura 3.2, que apresenta um esquema simplificado do injetor com seus parâmetros geométricos principais destacados.

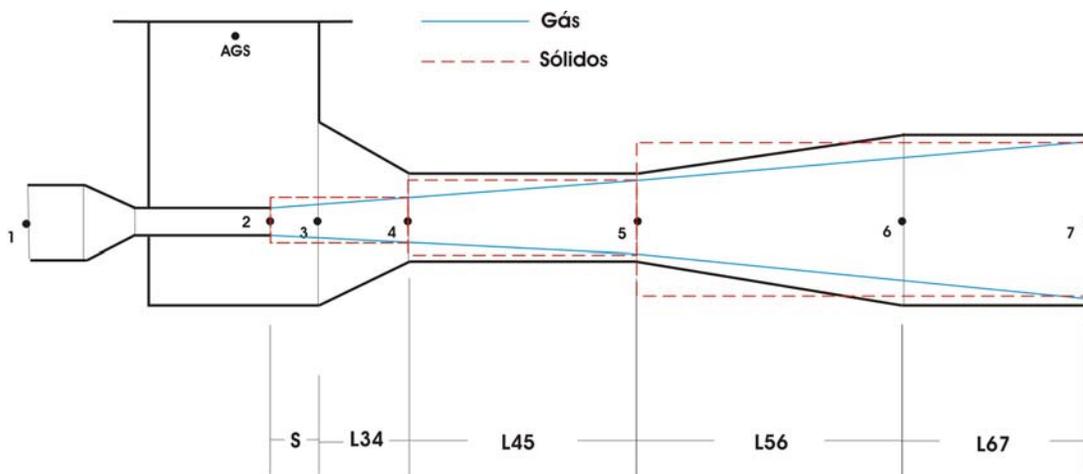


Figura 3.1 - Injetor utilizado na aplicação das equações fundamentais.

### 3.3.1 Distribuição de Pressão no Bocal da Entrada de Gás

Aplicando a Eq. (3.3) no volume de controle contido entre as superfícies de controle 1 e 2 da Figura 3.1, é possível prever a variação de pressão do gás devido à mudança de secção no bocal de entrada de gás no injetor, com a expansão do gás ao entrar na câmara de abastecimento:

$$\left( \frac{p_{G1}}{\rho_{G1}} + \alpha_1 \frac{u_{G1}^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_{G2}}{\rho_{G2}} + \alpha_2 \frac{u_{G2}^2}{2} + gz_2 \right) = h_{l_{G12}} \quad (3.6)$$

onde  $p_{G1}$ : pressão estática manométrica em 1 [Pa],  $p_{G2}$ : pressão estática manométrica em 2 [Pa]  
 $u_{G1}$ : velocidade do gás em 1 [m/s],  $u_{G2}$ : velocidade do gás em 2 [m/s],  $\rho_{G1}$ : densidade do gás em 1 [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{G2}$ : densidade do gás em 2 [kg/m<sup>3</sup>],  $h_{l_{12}}$ : perda localizada [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>],  $z_1$ : posição do centro do tubo em 1 [m],  $z_2$ : posição do centro do tubo em 2 [m],  $\alpha_1$ : coeficiente de energia cinética em 1 [adimensional],  $\alpha_2$ : coeficiente de energia cinética em 2 [adimensional].

Como se trata de escoamento turbulento os coeficientes de energia cinética são muito próximos da unidade  $\alpha_1 = \alpha_2 \cong 1$ , e as irreversibilidades no escoamento são consideradas na parcela de perda localizada  $h_{l_{12}}$ .

Reescrevendo a Eq. (3.6) tem-se:

$$\frac{p_{G1}}{\rho_{G1}} - \frac{p_{G2}}{\rho_{G2}} + \frac{u_{G1}^2}{2} - \frac{u_{G2}^2}{2} = h_{l_{G12}} \quad (3.7)$$

onde, por definição,

$$h_{l_{G12}} = K_{12} \frac{u_{G2}^2}{2} \quad (3.8)$$

e  $K_{12}$ : coeficiente de perda de pressão [adimensional],

Dáí:

$$\frac{p_{G1} - p_{G2}}{\rho_{G1} \rho_{G2}} = \frac{u_{G2}^2}{2} \left\{ \left[ 1 - \frac{u_{G1}^2}{u_{G2}^2} \right] + K_{12} \right\} \quad (3.9)$$

A partir de um balanço de massa:

$$\frac{u_{G1}^2}{u_{G2}^2} = \left( \frac{\rho_{G2}}{\rho_{G1}} \right)^2 \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^4 \quad (3.10)$$

pode-se explicitar a Eq. (3.9) em função dos diâmetros do injetor, como é mostrado a seguir. Sabendo que o escoamento no bocal é monofásico e considerando-o incompressível, então  $\rho_{G1} = \rho_{G2} = \rho_G$ . Substituindo a Eq. (3.10) na Eq. (3.9) resulta a expressão final para a variação de pressão na entrada do gás na câmara de abastecimento:

$$\frac{p_{G1} - p_{G2}}{\rho_G} = \frac{u_{G2}^2}{2} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right] + K_{12} \right\} \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Distribuição de Pressão na Câmara de Abastecimento

Em sua entrada na câmara de abastecimento o gás sofre uma expansão devido à variação de geometria; ele se atrita com os sólidos provenientes do silo, e os acelera. Se o silo não for fechado, junto com os sólidos há uma entrada de gás, vindo do silo, que também é acelerado pelo jato principal de gás.

De acordo com a hipótese 5, o particulado é acelerado por um gás com velocidade constante. Bohnet e Wagenknecht (1978) definiram esta velocidade como sendo a média das velocidades de entrada e saída do volume de controle definido pelas superfícies 2 e 5 da Figura 3.1. O mesmo procedimento foi adotado para a densidade do gás, como é mostrado abaixo:

$$u_{G24} = \frac{(u_{G2} + u_{G5})}{2} \quad (3.12)$$

e

$$\rho_{G24} = \frac{(\rho_{G2} + \rho_{G5})}{2} \quad (3.13)$$

onde:  $u_{G2}$ : velocidade do gás em 2 [m/s],  $u_{G5}$ : velocidade do gás em 5 [m/s],  $u_{G24}$ : velocidade média do gás entre 2 e 4 [m/s],  $\rho_{G2}$ : densidade do gás em 2 [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{G5}$ : densidade do gás em 5 [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{G24}$ : densidade média do gás entre 2 e 4 [kg/m<sup>3</sup>].

Observar que a velocidade média do gás na câmara de abastecimento abrangeu desde a região de entrada do jato de gás até a saída do tubo de mistura. Isto porque evidências experimentais apresentadas por Bohnet e Wagenknecht (1978) e Bohnet (1985), mostraram que o jato de gás ao entrar no injetor expande-se dentro do tubo de mistura, tocando-o apenas quando seu diâmetro se aproxima de  $d_5$ . Entre as seções 2 e 5 não se sabe realmente como o jato se expande, tornando difícil a previsão de velocidade em 4. Já as velocidades do gás em 2 e 5 são obtidas através da equação da conservação da massa, pois nestes pontos o gás escoou ao longo da superfície do injetor.

A velocidade do gás de transporte ao atravessar a seção de entrada do tubo de mistura,  $u_{G4}$ , é admitida igual a  $u_{G24}$ . Considerando a densidade média do gás, obtém-se a variação da pressão entre 2 e 4 a partir da equação da energia:

$$\frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24}} + \left( \frac{u_{G2}^2}{2} - \frac{u_{G24}^2}{2} \right) = h_{l_{G24}} \quad (3.14)$$

onde  $p_{G2}$ : pressão manométrica em 2 [Pa],  $p_{G4}$ : pressão manométrica em 4 [Pa],  $u_{G2}$ : velocidade do gás em 2 [m/s],  $u_{G24}$ : velocidade média do gás entre 2 e 4 [m/s],  $\rho_{G24}$ : densidade média do gás entre 2 e 4 [kg/m<sup>3</sup>].

A energia necessária para que o escoamento principal de gás acelere o gás proveniente do silo, pode ser obtida integrando a Eq. (3.5), como em Bohnet (1985):

$$\frac{P_{GS2} - P_{GS4}}{\rho_{G24}} = - \frac{\dot{M}_{GS}}{\dot{M}_{GT}} u_{G24}^2 \quad (3.15)$$

e

$$\dot{M}_{GS} = A_s \sqrt{2 \rho_{GS} (p_{G2} - p_{atm})} \quad (3.16)$$

onde  $p_{GS2}$ : pressão estática manométrica do gás proveniente do silo em 2 [Pa],  $p_{GS4}$ : pressão manométrica do gás proveniente do silo em 4 [Pa],  $u_{G24}$ : velocidade média do gás entre 2 e 4 [m/s],  $\rho_{G24}$ : densidade média do gás, entre 2 e 4 [kg/m<sup>3</sup>],  $A_s$ : área da secção transversal da entrada de sólidos [m<sup>2</sup>],  $\rho_{GS}$ : densidade do gás que escoo junto com o particulado proveniente do silo [kg/m<sup>3</sup>],  $p_{atm}$ : pressão atmosférica [Pa],  $\dot{M}_{GS}$ : descarga de gás proveniente do silo [kg/s] e  $\dot{M}_{GT}$ : descarga total de gás [kg/s]. A razão da descarga de gás proveniente do silo  $\dot{M}_{GS}$  em relação a descarga de total de gás  $\dot{M}_{GT}$ , isto é,  $\frac{\dot{M}_{GS}}{\dot{M}_{GT}}$ , é um fator de ponderação.

As descargas são definidas como em Bohnet (1985):

$$\dot{M}_{GT} = \dot{M}_{G2} + \dot{M}_{GS} \quad (3.17)$$

Analogamente, a energia consumida para acelerar as partículas sólidas, usando como ponderador a relação da descarga de sólidos  $\dot{M}_p$  em relação à descarga total de gás  $\dot{M}_{GT}$ , a chamada carga de sólidos  $\varphi = \dot{M}_p / \dot{M}_{GT}$ , pode ser estimada por:

$$\frac{P_{P2} - P_{P4}}{\rho_{G24}} = - \frac{\dot{M}_p}{\dot{M}_{GT}} u_{G24} (u_{P4} - u_{P2}) \quad (3.18)$$

onde  $p_{p2}$  e  $p_{p4}$ : pressão manométrica correspondente à aceleração das partículas em 2 e 4, respectivamente [Pa],  $u_{p2}, u_{p4}$ : velocidade das partículas nas seções 2 e 4[m/s] .

Assim, subtraindo as perdas de energia consumidas correspondentes à aceleração do gás e das partículas provenientes do silo, da energia do gás injetado na entrada, obtém-se das Eqs. (3.14), (3.15) e (3.18), a perda de pressão na câmara de abastecimento:

$$\frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24}} = \left\{ \left( \frac{u_{G24}^2}{2} - \frac{u_{G2}^2}{2} \right) + h_{l_{G24}} \right\} + \frac{\dot{M}_{GS}}{\dot{M}_{GT}} u_{G24}^2 + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} u_{G24} (u_{P4} - u_{P2}) \quad (3.19)$$

ou

$$\frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24}} = \frac{u_{G2}^2}{2} \left\{ \left[ \left( \frac{u_{G24}^2}{u_{G2}^2} - 1 \right) + h_{l_{G24}} \right] + 2 \frac{\dot{M}_{GS}}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{G24}^2}{u_{G2}^2} + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{G24}}{u_{G2}} \frac{(u_{P4} - u_{P2})}{u_{G2}} \right\} \quad (3.20)$$

A Eq. (3.20) pode ser explicitada em termos dos diâmetros do injetor. Partindo do conceito de descarga média da hipótese 5:

$$\dot{M}_{G24} = \frac{(\dot{M}_{G2} + \dot{M}_{GT})}{2} \quad (3.21)$$

e definindo o diâmetro médio de mistura  $d_{G24}$  tal que:

$$d_{G24}^2 = \frac{\dot{M}_{G24}}{\rho_{G24} u_{G24}} \frac{4}{\pi} \quad (3.22)$$

obtem-se, substituindo a Eq.(3.21) na Eq. (3.22), que:

$$u_{G24} = \frac{2 \left( \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} + 1 \right) \dot{M}_{G2}}{\rho_{G2} \pi d_{G24}^2 \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho_{G4}}{\rho_{G2}} \right)} \quad (3.23)$$

daí:

$$u_{G24}^2 = \left( \frac{4 \dot{M}_{G2}}{\rho_{G2} \pi d_{G24}^2} \right)^2 \left( \frac{\dot{M}_{GT}/\dot{M}_{G2} + 1}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right)^2 \quad (3.24)$$

mas,

$$\frac{\dot{M}_{G2}}{\rho_{G2}} = u_{G2} \pi \frac{d_2^2}{4} \quad (3.25)$$

daí:

$$\frac{u_{G24}^2}{u_{G2}^2} = \left( \frac{\dot{M}_{GT}/\dot{M}_{G2} + 1}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right)^2 \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 \quad (3.26)$$

Substituindo a Eq. (3.26) na Eq. (3.20) obtem-se a expressão de variação de pressão entre 2 e 4 em função do diâmetro dos tubos do injetor:

$$\begin{aligned} \frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24}} = \frac{u_{G2}^2}{2} \left\{ \left[ \left( \left( \frac{\dot{M}_{GT}/\dot{M}_{G2} + 1}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right)^2 \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 \right) - 1 \right] + h_{l_{G24}} \right\} \\ + \left[ \left( \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} \right)^2 - 1 \right] \left[ \frac{2}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right] \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{(u_{P4} - u_{P2})}{u_{G2}} \left[ \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} + 1 \right] \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

onde, por definição:

$$h_{l_{G24}} = K_{24} \frac{u_{G2}^2}{2},$$

assim:

$$\begin{aligned} \frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24}} = \frac{u_{G2}^2}{2} \left\{ \left[ \left( \left( \frac{\dot{M}_{GT}/\dot{M}_{G2} + 1}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right)^2 \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 \right) - 1 \right] + K_{24} \right] \\ + \left[ \left( \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{2}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right) \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{(u_{P4} - u_{P2})}{u_{G2}} \left[ \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} + 1 \right] \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.28)$$

O primeiro termo do lado direito da Eq. (3.28) representa a variação de pressão devido à expansão do gás de transporte ao longo da câmara, o segundo termo representa a perda de pressão correspondente à quantidade de movimento para acelerar o gás secundário proveniente do silo, e o terceiro termo a perda de pressão correspondente à quantidade de movimento necessária para acelerar as partículas sólidas alimentadas.

O diâmetro médio da mistura na câmara de abastecimento,  $d_{G24}$  pode ser obtido a partir da Eq. (3.22) :

$$d_{G24}^2 = \frac{\dot{M}_{G24}}{\rho_{G24} u_{G24}} \frac{4}{\pi}$$

Multiplicando e dividindo esta equação pela descarga total de gás  $\dot{M}_{GT}$  obtem-se  $d_{G24}$  em função da relação  $\dot{M}_{G2}/\dot{M}_{GT}$ , que indica a fração de gás vinda do compressor existente na

descarga total. Se  $\dot{M}_{G2}/\dot{M}_{GT} = 1$  indica que todo gás contido no injetor é proveniente do compressor. :

$$d_{G24}^2 = \frac{\dot{M}_{G24}}{\rho_{G24} u_{G24}} \frac{4 \dot{M}_{GT}}{\pi \dot{M}_{GT}} = 4 \frac{\dot{M}_{G24}}{\dot{M}_{GT}} \frac{\dot{M}_{GT}}{\rho_{G24} u_{G24} \pi}$$

Da definição de  $\dot{M}_{G24}$ , conforme a Eq. (3.21) vem:

$$\frac{\dot{M}_{G24}}{\dot{M}_{GT}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{M}_{G2} + \dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{GT}} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} + 1 \right)$$

Substituindo na equação acima resulta:

$$d_{G24}^2 = \frac{2 \left( \frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} + 1 \right)}{\frac{\rho_{G24} u_{G24} \pi}{\dot{M}_{GT}}} \quad (3.29)$$

Aplicando as Eqs. (3.12) e (3.13) no denominador da Eq. (3.29):

$$d_{G24}^2 = \frac{2 \left( \frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} + 1 \right)}{\frac{1}{\dot{M}_{GT}} \left( \frac{\rho_{G2} + \rho_{G4}}{2} \right) \left( \frac{u_{G2} + u_{G4}}{2} \right) \pi} \quad (3.30)$$

ou

$$d_{G24}^2 = \frac{2 \left( \frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} + 1 \right)}{\frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} \frac{1}{d_{G2}^2} \left( 1 + \frac{\rho_{G4}}{\rho_{G2}} \right) + \frac{1}{d_{G4}^2} \left( 1 + \frac{\rho_{G2}}{\rho_{G4}} \right)} \quad (3.31)$$

Multiplicando esta equação pela relação  $d_{G4}^2 d_{G2}^2 / d_{G4}^2 d_{G2}^2$ , para eliminar o inverso dos diâmetros no denominador, obtém-se a expressão para o diâmetro médio:

$$d_{G24} = d_{G2} d_{G4} \sqrt{\frac{2 \left( \frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} + 1 \right)}{\frac{\dot{M}_{G2}}{\dot{M}_{GT}} \left( 1 + \frac{\rho_{G4}}{\rho_{G2}} \right) d_{G4}^2 + \left( 1 + \frac{\rho_{G2}}{\rho_{G4}} \right) d_{G2}^2}} \quad (3.32)$$

### 3.3.3 Distribuição de Pressão no Tubo de Mistura

Nesta região, delimitada pelas superfícies de controle 4 e 5 da Figura 3.1, ainda há expansão do gás vindo da câmara de abastecimento e as partículas ainda são aceleradas. A força de atrito entre a parede do tubo e a mistura causa perda de pressão no escoamento. De acordo com as hipóteses (5) e (6) a velocidade e a densidade média no tubo de mistura são dadas por:

$$u_{G45} = \frac{(u_{G24} + u_{G5})}{2} \quad (3.33)$$

e

$$\rho_{G45} = \frac{(\rho_{G24} + \rho_{G5})}{2} \quad (3.34)$$

onde  $u_{G45}$ : velocidade média do gás entre 4 e 5 [m/s],  $\rho_{G45}$ : densidade média do gás entre 4 e 5 [kg/m<sup>3</sup>].

De modo análogo ao procedimento usado na câmara de abastecimento, pode-se obter o diâmetro médio de mistura do gás  $d_{G45}$  no tubo de mistura como:

$$d_{G45} = 2d_{G24}d_{G4} \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G4}}\right) \left(\frac{\rho_{G4}}{\rho_{G5}} d_{G24}^2 + d_{G5}^2\right)}} \quad (3.35)$$

Fazendo um balanço de energia no escoamento através do tubo de mistura, lembrando que a velocidade do fluido que atravessa a secção de entrada do tubo de mistura,  $u_{G4}$ , será igual a  $u_{G24}$  e a do que atravessa a secção de saída do tubo é  $u_{G5}$ , obtém-se:

$$\frac{p_{G4} - p_{G5}}{\rho_{G45}} + \left(\frac{u_{G24}^2}{2} - \frac{u_{G5}^2}{2}\right) = h_{l_{G45}} \quad (3.36)$$

onde  $p_{G5}$ : pressão manométrica em 5 [Pa] e  $u_{G5}$ : velocidade do gás em 5 [m/s].

Agora, a variação de pressão envolvida correspondente à quantidade de movimento necessária para acelerar as partículas pode ser determinada por:

$$\frac{p_{P4} - p_{P5}}{\rho_{G45}} = -\frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{TG}} u_{G45} (u_{P5} - u_{P4}) \quad (3.37)$$

onde  $p_{P4}$  e  $p_{P5}$ : pressão manométrica na aceleração das partículas em 4 e 5 respectivamente [Pa],  $u_{P4}, u_{P5}$ : velocidade das partículas nas seções 4 e 5 [m/s].

A variação de pressão referente ao atrito do escoamento gás-sólido e a parede do tubo de mistura, é composta de duas parcelas. A primeira parcela se refere ao escoamento do gás no tubo de mistura e a segunda parcela ao escoamento dos sólidos particulados.

Bohnet e Wagenknecht (1978) sugeriram que, devido à facilidade de manipulação, o fator de atrito da parcela gasosa pode ser fornecido pela equação de Blasius.

$$f_{G45} = 0,3164 / Re_{G45}^{0,25} \quad (3.38)$$

onde  $f_{G45}$ : fator de atrito devido ao escoamento de gás [adimensional],  $Re_{G45}$ : número de Reynolds referente ao escoamento do gás entre as seções 4 e 5 [adimensional].

O fator de atrito referente ao escoamento das partículas foi definido por Muschelknautz (1959) como:

$$f_{P45} = \frac{u_{P45}}{u_{G45}} f_p^* + \frac{2\beta}{\frac{u_{P45}}{u_{G45}} Fr_{G45}}, \quad (3.39)$$

para  $0,002 \leq f_p^* \leq 0,005$  e sendo que ,

$$Fr_{G45} = \frac{u_{G45}^2}{gd_{G45}} \quad (3.40)$$

onde  $Fr_{G45}$ : número de Froude [adimensional],  $f_{P45}$ : fator de atrito devido ao escoamento das partículas [adimensional],  $f_p^*$ : fator de atrito das partículas com a parede do tubo, determinado experimentalmente [adimensional],  $\beta$ : coeficiente de resistência gravitacional, determinado experimentalmente [adimensional], e  $u_{P45}$ : velocidade média da partículas entre as seções 4 e 5 [m/s]

Somando os dois fatores de atrito de maneira ponderada em relação ao escoamento do gás no tubo de mistura, a variação de pressão devido ao atrito é dada por:

$$\frac{p_{A4} - p_{A5}}{\rho_{G45}} = - \left( \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{GT}} f_{G45} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} f_{P45} \right) \frac{L_{45}}{d_{G45}} \frac{u_{G45}^2}{2} \quad (3.41)$$

onde  $p_{A4}$  e  $p_{A5}$ : variação de pressão manométrica gerada pelo atrito entre a mistura e a parede do injetor entre 4 e 5 [Pa], e  $L_{45}$ : comprimento do tubo de mistura [m].

Subtraindo a variação de pressão correspondente à aceleração do sólido particulado, bem como a parcela correspondente ao atrito entre o escoamento gás-sólido e a parede do tubo de mistura na Eq. (3.36), encontra-se a expressão para a variação de pressão do gás no tubo de mistura:

$$\frac{P_{G4} - P_{G5}}{\rho_{G45}} = \left\{ \left( \frac{u_{G5}^2}{2} - \frac{u_{G24}^2}{2} \right) + h_{i_{G45}} \right\} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} u_{G45} (u_{P5} - u_{P4}) + \left( f_{G45} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} f_{P45} \right) \frac{L_{45}}{d_{G45}} \frac{u_{G45}^2}{2} \quad (3.42)$$

ou

$$\frac{P_{G4} - P_{G5}}{\rho_{G45}} = \frac{u_{G5}^2}{2} \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{u_{G24}^2}{u_{G5}^2} \right) + h_{i_{G45}} \right] + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{G45}}{u_{G5}} \frac{(u_{P5} - u_{P4})}{u_{G5}} \right\} + \left( f_{G45} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} f_{P45} \right) \frac{L_{45}}{d_{G45}} \frac{u_{G45}^2}{u_{G5}^2} \quad (3.43)$$

Fazendo um balanço de massa para o escoamento de gás entre as seções 2 e 5 pode-se explicitar a Eq.(3.43) em termos dos diâmetros do injetor:

$$\dot{M}_{G5} = \dot{M}_{G24} = \dot{M}_{G45} \quad (3.44)$$

Daí:

$$\left( \frac{u_{G24}}{u_{G5}} \right)^2 = \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G24}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_{G24}} \right)^4 \quad (3.45)$$

e

$$\left( \frac{u_{G45}}{u_{G5}} \right) = \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G45}} \right) \left( \frac{d_5}{d_{G45}} \right)^2 \quad (3.46)$$

Substituindo as Eqs. (3.45) e (3.46) na Eq. (3.43) resulta a variação de pressão na região do tubo de mistura. Admitindo

$$h_{l_{G45}} = K_{45} \frac{u_{G5}^2}{2}$$

e substituindo, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{P_{G4} - P_{G5}}{\rho_{G45}} = \frac{u_{G5}^2}{2} \left\{ \left[ \left( 1 - \left( \left( \frac{\rho_{G24}}{\rho_{G5}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_{G24}} \right)^4 \right) \right) + K_{45} \right] + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{(u_{P5} - u_{P4})}{u_{G5}} \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G45}} \right) \left( \frac{d_5}{d_{G45}} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( f_{G45} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} f_{P45} \right) \frac{L_{45}}{d_{G45}} \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G45}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_{G45}} \right)^4 \right\} \quad (3.47) \end{aligned}$$

A primeira parcela do lado direito da Eq. (3.47) representa a variação de pressão devido à expansão do gás ao longo do tubo de mistura; a segunda parcela é a perda de pressão devido à quantidade de movimento consumida para acelerar as partículas sólidas e a terceira parcela representa a perda de pressão referente ao atrito da mistura com a parede do tubo.

### 3.3.4 Distribuição de Pressão no Difusor

No difusor, delimitado pelas superfícies de controle 5 e 7 da Figura 3.1, há recuperação da pressão do gás devido sua expansão e à desaceleração das partículas. Após o difusor existe uma extensão tubular pequena, o tubo de extensão,  $L_{67}$ , cuja variação de pressão é considerada incluída na do difusor.

Aplicando a Eq. (3.6) entre as secções de saída do tubo de mistura e do injetor, obtém-se:

$$\frac{P_{G5} - P_{G6}}{\rho_{G56}} + \left( \frac{u_{G5}^2}{2} - \frac{u_{G6}^2}{2} \right) = h_{l_{G57}} \quad (3.48)$$

onde  $p_{G6}$ : pressão manométrica em 6 [Pa],  $u_{G6} = u_{G7}$ : velocidade do gás em 6 [m/s] e  $\eta_7$ : eficiência de transformação de energia [adimensional].

A variação de energia correspondente à aceleração das partículas no difusor pode ser estimada a partir da Eq. (3.6):

$$\frac{p_{P6} - p_{P7}}{\rho_{G7}} = -\frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} u_{G7} (u_{P7} - u_{P6}) \quad (3.49)$$

onde  $p_{P6} - p_{P7}$ : variação de pressão correspondente à aceleração das partículas entre 6 e 7 [Pa], e  $u_{P6}, u_{P7}$ : velocidade das partículas em 6 e 7 [m/s].

Subtraindo a Eq. (3.49) de (3.48) resulta:

$$\frac{p_{G5} - p_{G6}}{\rho_{G56}} = \left[ \left( \frac{u_{G6}^2}{2} - \frac{u_{G5}^2}{2} \right) + h_{l_{G57}} \right] + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} u_{G7} (u_{P7} - u_{P6}) \quad (3.50)$$

ou

$$\frac{p_{G5} - p_{G6}}{\rho_{G56}} = \frac{u_{G5}^2}{2} \left\{ \left[ \left( \frac{u_{G6}^2}{u_{G5}^2} - 1 \right) + h_{l_{G57}} \right] + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{G7}}{u_{G5}} \frac{(u_{P7} - u_{P6})}{u_{G5}} \right\} \quad (3.51)$$

Fazendo um balanço de massa para o escoamento de gás entre as seções 5 e 6:

$$\frac{u_{G5}^2}{u_{G6}^2} = \left( \frac{\rho_{G7}}{\rho_{G5}} \right)^2 \left( \frac{d_7}{d_5} \right)^4 \quad (3.52)$$

e considerando que

$$h_{G57} = K_{57} \frac{u_{G5}^2}{2}$$

e que  $u_{G6} \cong u_{G7}$  e  $\rho_{G6} \cong \rho_{G7}$ , é possível expressar a Eq.(3.51) em termos dos diâmetros do injetor. Assim, substituindo a Eq. (3.52) na Eq. (3.51) resulta:

$$\frac{p_{G5} - p_{G7}}{\rho_{G57}} = \frac{u_{G5}^2}{2} \left\{ \left[ \left( \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G7}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_7} \right)^4 \right) - 1 \right] + K_{57} \right\} + 2 \frac{\dot{M}_p}{\dot{M}_{GT}} \frac{(u_{p7} - u_{p6})}{u_{G7}} \quad (3.53)$$

O primeiro termo da Eq. (3.53) representa a variação de pressão pela expansão do gás ao longo do difusor, o segundo termo representa o ganho de pressão correspondente à aceleração das partículas sólidas .

### 3.4 Velocidades da Partícula

#### 3.4.1 Velocidade de Saltação

A velocidade de saltação é a mínima velocidade do gás necessária para que a partícula seja transportada sem se depositar na superfície interna da parede dos tubos. Conhecendo a velocidade de saltação é possível determinar a descarga mínima de gás necessária para evitar a formação de dunas de partículas na tubulação. Hulbert e Kalman (2003) realizaram um estudo experimental sobre a saltação de partículas em escoamento diluído. O experimento foi realizado com partículas esféricas de alumina com  $\rho_p = 1170 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 1,6 - 1,7 \text{ mm}$ ; vidro com  $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 0,15 - 0,25 \text{ mm}$  e também  $d_p = 0,75 - 1 \text{ mm}$ ; metal com  $\rho_p = 7795 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 0,7 - 0,9 \text{ mm}$ ; areia com  $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 0,75 - 1 \text{ mm}$ ; sulfato de potássio com  $\rho_p = 2670 \text{ kg/m}^3$  e geometria irregular. Os autores fizeram uma comparação das expressões disponíveis para a velocidade de saltação desenvolvida por diversos autores com a velocidade de saltação medida em teste. Chegaram a conclusão que a fórmula empírica proposta por abaixo teve a melhor aproximação com os dados experimentais:

$$u_S = 2.8 \dot{M}_P^{0,1} d_{G7}^{0,428} d_P^{-0,023} \rho_P^{0,306} \rho_{G7}^{-0,405} \quad (\text{S.I.}) \quad (3.54)$$

### 3.4.2 Velocidade de Transporte da Partícula

Pode-se calcular a velocidade das partículas a partir de um balanço da quantidade de movimento em uma partícula esférica sujeita à força de arrasto do gás, à força de atrito com o meio e à força gravitacional fornece:

$$u_P \frac{du_P}{dl} = - \underbrace{g \left( \frac{u_G - u_P}{u_S} \right)^2}_{\text{Força de Arrasto Aerodinâmico}} + \underbrace{g \frac{u_P^2 f}{2 d_i}}_{\text{Força de Atrito entre Partícula/Parede}} + \underbrace{g \beta}_{\text{Força Gravitacional}} \quad (3.55)$$

onde  $l$ : posição da partícula longo do eixo do injetor [ $m$ ].

### 3.5 Determinação da Potência Consumida pelo Injetor

A potência consumida pelo injetor durante o transporte pneumático pode ser determinada pela aplicação da primeira lei da termodinâmica ao escoamento gasoso sob influência do material particulado transportado, conforme foi apresentado no trabalho de Michon e Bouard (1997). Para uma análise desta lei o injetor é envolvido em um volume de controle em que a entrada de gás, a entrada de sólidos e a saída da mistura gás-sólido são 1, S e 7, respectivamente. Como se trata de um equipamento operando em regime permanente, considerando que não há troca de calor entre o volume de controle e o ambiente, a equação da primeira lei fica:

$$\dot{W} = \sum \dot{M}_{entra} e_{T\ entra} - \sum \dot{M}_{sai} e_{T\ sai} \quad (3.56)$$

$$\text{onde } e_T = h + \frac{u^2}{2} + gz \quad (3.57)$$

sendo  $\dot{W}$  : potência consumida [W],  $e_T$  : energia total específica [kJ/kg],  $h$ : entalpia específica [kJ/kg].

Aplicando a Eq. (3.56) ao injetor resulta:

$$\dot{W} = \dot{M}_{G2}e_{TG2} + \dot{M}_{GS}e_{TGS} + \dot{M}_Pe_{TPS} - \dot{M}_{TG}e_{TG7} - \dot{M}_Pe_{TP7} \quad (3.58)$$

Expandindo as parcelas de energia, vêem:

$$\begin{aligned} \dot{W} = \dot{M}_{G2} \left( h_{G2} + \frac{u_{G2}^2}{2} \right) + \dot{M}_{GS} \left( h_{GS} + \frac{u_{GS}^2}{2} + gz_{GS} \right) + \dot{M}_P \left( h_{GS} + \frac{u_{PS}^2}{2} + gz_{PS} \right) \\ - (\dot{M}_{TG} + \dot{M}_P) \left( h_{G7} + \frac{u_{G7}^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.59)$$

Admitindo que:

- A variação de energia interna pode ser desprezada em todas as secções do volume de controle, devido ao fato de se considerar o escoamento adiabático;
- As parcelas de energia potencial em todas as secções do volume de controle não influenciam a potência ( injetor horizontal );
- A parcela de energia referente à entrada dos sólidos e do gás que, eventualmente, entra junto com os sólidos pode ser desprezada.

a Eq. (3.59) se reduz a:

$$\dot{W} = \dot{M}_{G2} \left( \frac{p_{G2}}{\rho_{G2}} + \frac{u_{G2}^2}{2} \right) + \dot{M}_{TG} \left( \frac{p_{G7}}{\rho_{G7}} + \frac{u_{G7}^2}{2} \right) - (\dot{M}_{TG} + \dot{M}_P) \left( \frac{p_{G7}}{\rho_{G7}} + \frac{u_{G7}^2}{2} \right) \quad (3.60)$$

## **Capítulo 4**

### **Descrição da Bancada e Procedimento Experimental**

#### **4.1 Introdução**

A informação disponível para o projeto de injetores é restrita. Este trabalho contribui para um melhor conhecimento do tema através de uma série de testes experimentais.

Inicialmente foram obtidos dados para a comparação do comportamento do catalisador para FCC com os dados relatados por Bohnet (1978) e Michon e Bouard (1997) para outros materiais. Para realizar este experimento, foi construído um injetor semelhante ao utilizado por Bohnet (1978), com um acréscimo de tomadas de pressão para permitir a determinação da distribuição da pressão ao longo do injetor, de modo a também incluir a câmara de abastecimento e a entrada do gás, num total de quatorze tomadas de pressão.

Em seguida foram realizados testes para checar a influência da geometria, a saber, a distância  $S$  e o diâmetro do bocal de entrada de gás de transporte no injetor de sólidos,  $d_2$ .

#### **4.2 Descrição da Bancada Experimental**

##### **4.2.1 Fluxograma da Instalação**

A bancada experimental foi montada no laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, com base no trabalho de Lopes (2003), conforme Figura 4.1.

A bancada é composta dos seguintes itens:

- Soprador tipo “*Roots*” - CP1;
- Compressor - CP2;
- Válvula de desvio tipo gaveta - VFD1;
- Válvula de desvio tipo gaveta - VFD2;
- Válvula de estrangulamento tipo gaveta - VR2;
- Silo de abastecimento de FCC - SL1;
- Válvula de estrangulamento tipo gaveta - VR1;
- Injetor de sólidos, tipo venturi - IJ1;
- Ciclone - CL1;
- Filtro de tecido para a coleta de sólidos na saída de ar do ciclone - FP1;
- Silo para a coleta de sólidos separados pelo ciclone - SL2;

A instrumentação é composta por:

- Placa de Orifício - MU1;
- Termopares IOPE tipo K - TE1;
- Transdutor de pressão SMAR LD301 - TD1;
- Sistema de aquisição de dados Lynx CAD12/32;
- Balança Eletrônica TOLEDO de 100 kg;
- Balança Eletrônica OHAUS de 12 kg.
- Computador Pentium 133 MHz 64Mb RAM.

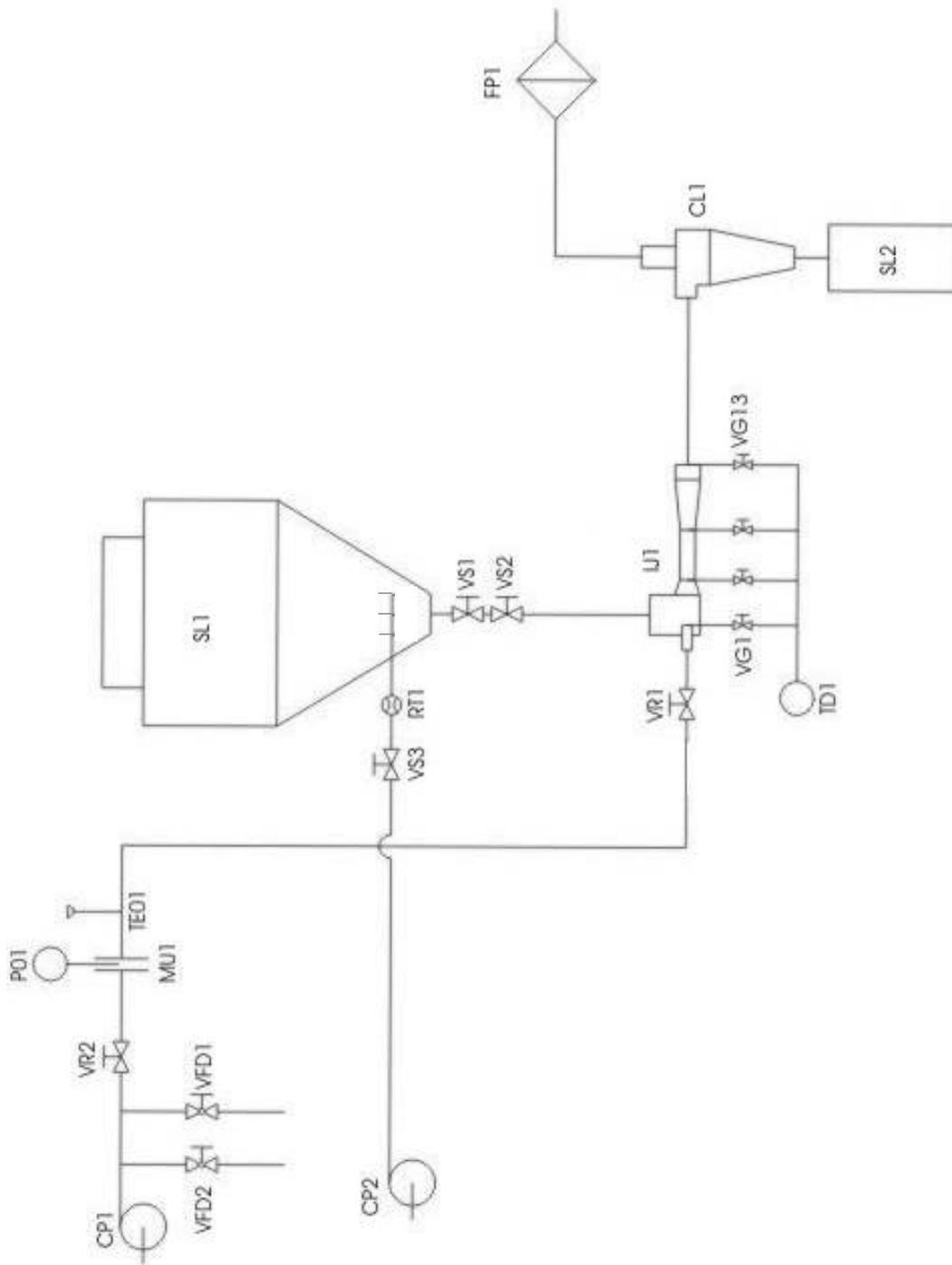


Figura 4.1 – Fluxograma da Instalação

## 4.2.2 O Injetor

O injetor utilizado, esquematizado na Figura 4.2, foi construído em aço INOX 304.

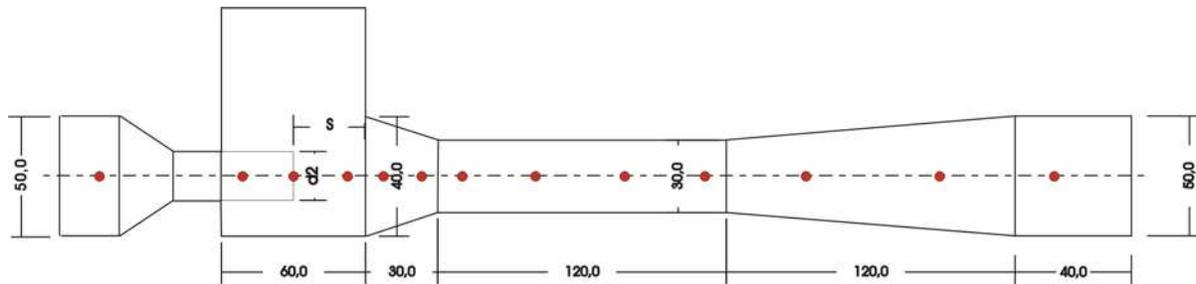


Figura 4.2 - Desenho Esquemático do Injetor – IJ1

O diâmetro  $d_2$  e a distância  $S$  são variáveis, de acordo com a configuração desejada para o experimento. Os injetores do gás de transporte BI1, BI2 e BI3 foram construídos com diâmetros de entrada do gás na câmara de abastecimento,  $d_2$ , iguais a 20,40 mm, 15,98 mm e 12,64 mm, respectivamente. A dimensão  $S$  foi variada por meio de um rosca usinada no diâmetro externo dos bicos injetores. A Figura 4.3 traz uma fotografia do injetor.



Figura 4.3 - Vista do Injetor de Particulado Sólido

Para obter a pressão ao longo do injetor, foram feitas tomadas de pressão, mostradas na Figura 4.4. Todas as tomadas são ligadas a um único transdutor de pressão através de um sistema de distribuição, *manifold*, construído com tubos de PVC com diâmetro nominal de ½ polegada. Neste *manifold* foram instaladas válvulas com diâmetro nominal de ½ polegada, de modo a permitir a aquisição da pressão um ponto por vez.

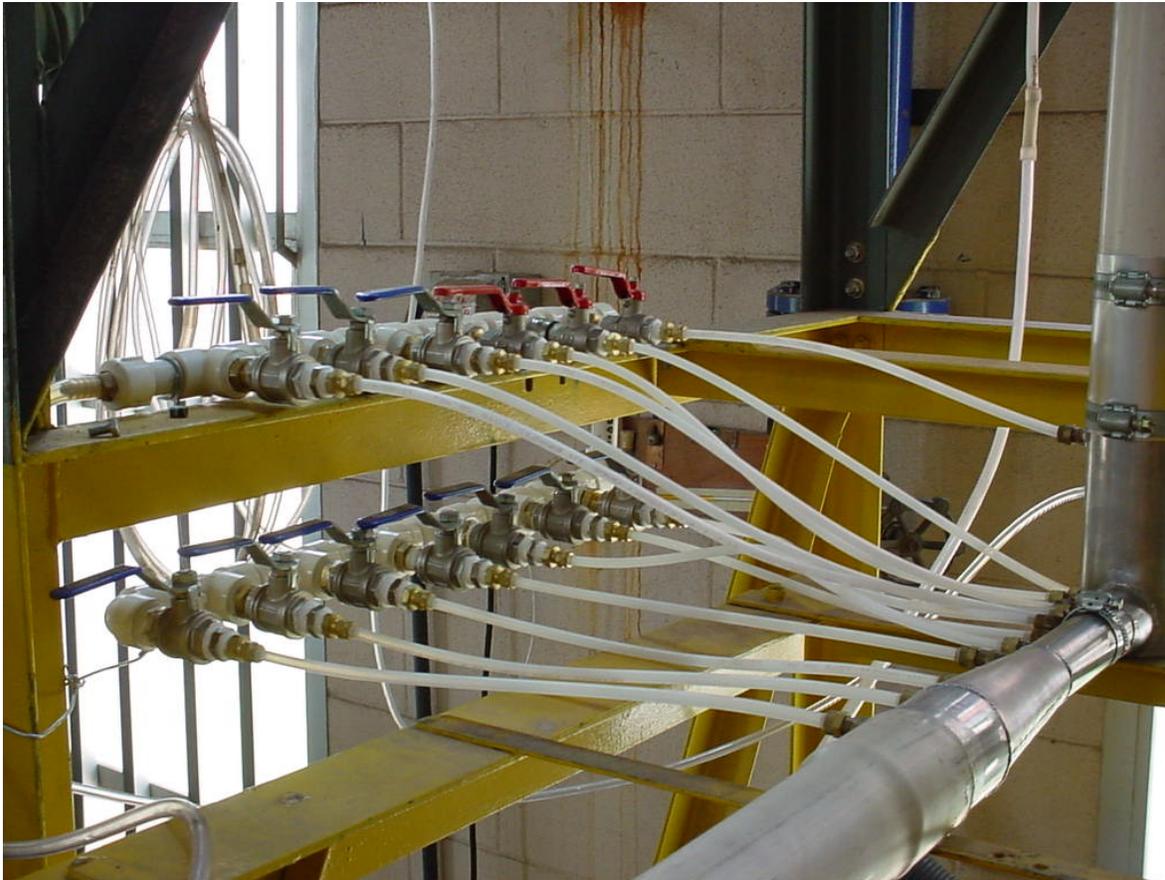


Figura 4.4 - Sistema de Válvulas para Medição de Pressão ao Longo do Injetor

#### 4.2.3 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados foi configurado para adquirir e armazenar as pressões medidas. Como a frequência de aquisição da placa de aquisição CAD12/32 é de 25000 amostras por segundo, e foram utilizados 5 canais de aquisição no bloco condicionador de sinais, a taxa de aquisição máxima por canal foi de 5000 amostras por segundo.

De acordo com o critério de Nyquist a frequência de aquisição de dados de um canal deve valer duas vezes a frequência máxima de oscilação do sinal que está sendo medido. Em média, para escoamento gás-sólido foi verificado que, a frequência máxima de oscilação de um sinal é de 30 a 40 Hz. Pelo critério de Nyquist a frequência de medição deve ser de 60 a 80 Hz. Neste experimento foi usada a frequência de aquisição de 120 Hz, pois o computador realizou o procedimento de aquisição com facilidade. Acima de 200 Hz começa haver o comprometimento do desempenho de processamento do computador devido às grandes matrizes de dados que o programa computacional cria. O programa de aquisição de dados encontra-se no Apêndice A.

### 4.3 Material Sólido Injetado

O material injetado foi um catalisador para FCC, que é um sólido particulado pertencente a classe A da classificação de Geldart, e que apresenta as seguintes características (Petrobrás 2000):

Densidade aparente:  $\rho_p = 1370 \text{ kg/m}^3$

Densidade absoluta:  $\rho_{p_{ABS}} = 2550 \text{ kg/m}^3$

Densidade bulk:  $\rho_{p_B} = 700 \text{ a } 750 \text{ kg/m}^3$

Esfericidade:  $\phi = 0,8$

Neste ensaio, o FCC foi injetado sem uma separação granulométrica. Segundo Lopes (2003), que utilizou um classificador Mastersizer neste material, a distribuição granulométrica é como mostrada na Tabela 4.1 e Figura 4.5. O diâmetro médio das partículas é de aproximadamente  $105,16 \mu\text{m}$ .

Tabela 4.1 Distribuição Granulométrica do Particulado

Faixa Gran. [mm]	Dia. Médio [ $\mu\text{m}$ ]	Fração Mássica [%]
<38	19,0	2,7
38-45	41,5	1,9
45-53	49,0	3,6
53-63	58,0	6,8
63-75	69,0	10,7
75-90	82,5	15,1
90-106	98,0	15,4
106-125	115,5	15,4
125-150	137,5	13,2
150-180	165,0	8,6
180-212	196,0	4,3
212-250	231,0	2,3

#### 4.4 Programa de Testes

Inicialmente os testes foram realizados para a comparação do comportamento do catalisador para FCC com os dados disponíveis relatados por outros autores: Bohnet (1978, 1985), Michon e Bouard (1997) e Chellappan e Ramaiyam (1986).

Para realizar o experimento, um injetor de sólidos semelhante ao utilizado por Bohnet (1978) foi construído, mas com 14 tomadas de pressão ao longo do injetor. A descarga de sólidos foi fixada em  $\dot{M}_p = 0,08 \text{ kg/s}$ , semelhante a de Bohnet (1985); as descargas de gás foram  $\dot{M}_G = 0,0355 \text{ kg/s}$ ,  $0,0408 \text{ kg/s}$ ,  $0,0492 \text{ kg/s}$  e  $0,0590 \text{ kg/s}$ , num total de quatro ensaios.

Em seguida foram realizados testes para verificar o comportamento do injetor em função das características geométricas do bocal de entrada de gás de transporte no injetor de sólidos: a distância  $S$  e o diâmetro  $d_2$  de entrada do gás na câmara de abastecimento.

Foram realizados nove testes com ar e nove com a mistura Ar + FCC, identificados conforme as Tabelas 4.2 e 4.3. Os diâmetros  $d_2$  usados foram  $12,64 \text{ mm}$ ,  $15,98 \text{ mm}$  e  $20,4 \text{ mm}$ ,

como já foi visto, e os valores de S foram: 10mm, 30mm e 50mm, semelhantes ao trabalho de Wang e Wypych (1999).

Tabela 4.2 Ensaios com a Mistura Ar + FCC

S [mm]	d2 [mm]		
	20.4	15.98	12.64
10	1	4	7
30	2	5	8
50	3	6	9

Tabela 4.3 Ensaios com Ar

S [mm]	d2 [mm]		
	20,4	15,98	12,64
10	10	13	16
30	11	14	17
50	12	15	18

## 4.5 Procedimento Experimental

### 4.5.1 Partida

- 1) Ligar o computador e o bloco condicionador de sinais;
- 2) Aguardar aproximadamente 40 minutos para pré-aquecer os componentes eletrônicos;  
Durante este período de tempo seguir os passos:
- 3) Fechar as válvulas VS1 e VS2;
- 4) Utilizando uma talha, carregar o silo com o material a ser injetado;
- 5) Fechar o silo;
- 6) Verificar se as mangueiras de ar comprimido, utilizadas para fluidizar o silo, estão conectadas a linha secundária de ar comprimido;
- 7) Abrir a válvula VS3 de aeração do silo.
- 8) Através do rotâmetro RT1 regular a descarga de ar desejada;
- 9) Abrir válvula VR1;

- 10) Fechar válvulas VR2 e VR3;
- 11) Fechar as válvulas VG1 até VG13;
- 12) Pesar o filtro FP1 e o compartimento SL2 que são conectados ao ciclone;
- 13) Conectar o filtro FP1 na saída de ar do ciclone;
- 14) Conectar o compartimento de sólidos SL2 na saída de sólidos do ciclone;
- 15) Fazer uma verificação visual de segurança da bancada;
- 16) Verificar se o cabo do transdutor TD1 está conectado ao sistema de aquisição de dados;

#### **4.5.2 Verificação do Sistema de Aquisição de Sinais.**

- 1) Abrir válvula by-pass VFD1 da linha de ar comprimido no laboratório FD1;
- 2) Fechar a válvula by-pass VFD2 da linha de ar comprimido no laboratório FD2;
- 3) Ligar chave geral do compressor *roots* CP1
- 4) Acionar o contator e selecionar a rotação desejada;
- 5) Abrir válvulas VR2 e VR3 totalmente;
- 6) Fechar válvula by-pass VFD1 da linha de ar comprimido no laboratório FD1;
- 7) Abrir VG1 e verificar se o sinal foi lido pelo computador.
- 8) Fechar VG1;
- 9) Abrir válvula by-pass VFD1;
- 10) Fechar VR1;

#### **4.5.3 Ajuste da Descarga de Partículas e de Ar**

- 1) Abrir VR1;
- 2) Fechar válvula by-pass VFD1
- 3) Através do manômetro tipo “U” MU1, conectado à placa de orifício PO1, determinar a queda de pressão no escoamento de ar;
- 4) Ler a temperatura do ar utilizando PID1;
- 5) Determinar a descarga de ar através de um programa computacional apresentado no Apêndice B;

- 6) Para ajustar a descarga de sólidos abrir VS1 e alterar a posição de VS2 até que o sistema de aquisição de dados indique que está ocorrendo a descarga desejada.
- 7) Fechar VS1, VS2 totalmente;

#### **4.5.4 Tomadas de Pressão**

- 1) Esperar 10 segundos até a mistura entrar em regime;
- 2) Ler no rotâmetro RT1 a descarga de ar que está entrando no silo SL1
- 3) Abrir VS1 totalmente;
- 4) Esperar 30 segundos até entrar em regime;
- 5) Abrir VG1;
- 6) Acionar e aguardar o sistema de aquisição de dados adquirir os dados;
- 7) Após o término da aquisição, fechar VG1;
- 8) Repetir as etapas de 5 a 7 para todas as válvulas das tomadas de pressão no injetor;
- 9) Fechar VS1 totalmente;
- 10) Abrir válvula by-pass VFD1
- 11) Fechar VR2;

## **4.6 Redução dos Dados**

### **4.6.1 Redução dos Dados Experimentais Obtidos**

- Pressão Estática Manométrica no Injetor

A pressão estática do escoamento do gás e da mistura foi obtida através de um transdutor de pressão TD1 com saída em corrente elétrica contínua na faixa de 4 a 20 mA. Através da placa de aquisição de dados a corrente foi convertida em tensão elétrica, na faixa de 0 a 5 V. Com o auxílio de uma rotina de aquisição de dados converteu-se tensão elétrica na unidade física de pressão mmca. Embora não seja uma unidade do sistema internacional, ela apresenta facilidade

de manipulação e entendimento do fenômeno em que estiver envolvida. No entanto, na apresentação dos resultados foi utilizada a unidade do sistema internacional de unidades SI.

- Densidade do Gás  $\rho_G$ :

$$\rho_G = \frac{p_G}{RT} \left[ \text{kg}/\text{m}^3 \right] \quad (4.1)$$

onde  $p_G$ : representa a pressão estática absoluta do escoamento [Pa],  $R$ : constante do ar [adimensional] e  $T$ : temperatura do gás [K].

- Velocidade do Gás  $u_G$ :

$$u_G = \frac{\dot{M}_G}{\rho_G A} \left[ \text{m}/\text{s} \right] \quad (4.2)$$

onde  $\dot{M}_G$ : representa a descarga de gás em uma seção qualquer do injetor [kg/s] e  $A$ : área qualquer de seção transversal ao escoamento [m<sup>2</sup>].

- Número de Reynolds  $Re$ :

$$Re = \frac{\rho_G u_G d}{\mu_G} \text{ [adimensional]} \quad (4.3)$$

onde  $\mu_G$ : representa a viscosidade cinemática do gás [m<sup>2</sup>/s] e  $d$ : diâmetro da seção transversal ao escoamento [m].

- Número de Mach:

$$Mach = \frac{u_G}{c} \text{ [adimensional]} \quad (4.4)$$

onde

$$c = \sqrt{kRT} \text{ [m/s]} \quad (4.5)$$

onde  $c$ : representa a velocidade do som [m/s].

- Carga de Sólidos  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \text{ [adimensional]} \quad (4.6)$$

onde

$$\dot{M}_P = \frac{M_{P_{CICLONE}} + M_{P_{FILTRO}}}{t} \quad (4.7)$$

e

$$\dot{M}_{GT} = \dot{M}_{G2} + \dot{M}_{GS}$$

onde  $\dot{M}_{GT}$ : representa a descarga de gás no bocal somado à descarga de gás proveniente do silo [kg/s],  $M_{P_{CICLONE}}$ : massa do particulado que foi coletado pelo ciclone em SL2 [kg],  $M_{P_{FILTRO}}$ : massa do particulado que foi retido pelo filtro FP1 [kg] e  $t$ : tempo de duração de cada teste [s].

- Coeficientes de Perda de Pressão  $K$  [adimensional]

Na câmara de abastecimento:

$$K_{24} = \frac{p_{G2} - p_{G4}}{\rho_{G24} \frac{u_{G2}^2}{2}} - \left\{ \left( \left( \frac{\dot{M}_{GT}/\dot{M}_{G2} + 1}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right)^2 \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 \right) - 1 \right\} + \left[ \left( \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{2}{1 + \rho_{G4}/\rho_{G2}} \right) \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^4 + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{P4}}{u_{G2}} \left[ \frac{\dot{M}_{GT}}{\dot{M}_{G2}} + 1 \right] \left( \frac{d_2}{d_{G24}} \right)^2 \right\} \quad (4.8)$$

No tubo de mistura:

$$K_{45} = \frac{p_{G4} - p_{G5}}{\rho_{G45} \frac{u_{G5}^2}{2}} - \left\{ 1 - \left( \left( \frac{\rho_{G24}}{\rho_{G5}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_{G24}} \right)^4 \right) \right\} + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{P45}}{u_{G5}} \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G45}} \right) \left( \frac{d_5}{d_{G45}} \right)^2 + \left( f_{G45} + \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} f_{P45} \right) \frac{L_{45}}{d_{G45}} \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G45}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_{G45}} \right)^4 \right\} \quad (4.9)$$

No difusor:

$$K_{57} = \frac{p_{G5} - p_{G7}}{\rho_{G57} \frac{u_{G5}^2}{2}} - \left\{ \left( \left( \frac{\rho_{G5}}{\rho_{G7}} \right)^2 \left( \frac{d_5}{d_7} \right)^4 \right) - 1 \right\} + 2 \frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} \frac{u_{P67}}{u_{G5}} \right\} \quad (4.10)$$

#### 4.6.2 Redução dos Resultados Experimentais Apresentados por Bohnet (1985)

Para efeito de comparar os dados experimentais de Bohnet, apresentados em termos dos Coeficientes de Transformação de Energia Cinética em Pressão, com os dados obtidos neste experimento, apresentados em termos dos Coeficientes de Perda de Pressão, determinou-se a correspondência segundo as expressões:

$$K_{24} = \left( 1 - \left( \frac{u_{G24}}{u_{G2}} \right)^2 \right) (1 - \eta_{24}) [\text{adimensional}] \quad (4.11)$$

$$K_{45} = \left( \left( \frac{u_{G24}}{u_{G5}} \right)^2 - 1 \right) (1 - \eta_{45}) [\text{adimensional}] \quad (4.12)$$

$$K_{57} = \left( \left( \frac{u_{G7}}{u_{G5}} \right)^2 - 1 \right) (1 - \eta_{57}) [\text{adimensional}] \quad (4.13)$$

Os dados obtidos nos testes estão dispostos no Apêndice C em forma de tabelas.

## Capítulo 5

### Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes experimentais sobre a distribuição de pressão ao longo do injetor de sólidos, o efeito da variação de  $S$  e  $d_2$  no desempenho, e os coeficientes de perda de pressão: na câmara de abastecimento,  $K_{24}$ , no tubo de mistura,  $K_{45}$  e no difusor,  $K_{57}$ . Esta informação é utilizada no dimensionamento de injetores, conforme será visto no Capítulo 6.

#### 5.1 Distribuição de Pressão no Injetor

##### 5.1.1 Escoamento de Ar

A Figura 5.1 mostra a distribuição de pressão estática ao longo do injetor para o escoamento apenas de gás, cuja descarga variou de 0,0389 a 0,0625 kg/s. Nota-se que existe uma dependência entre a distribuição de pressão e a descarga de gás. A variação total de pressão no injetor aumenta com a descarga de gás. Observa-se, também, que, para as menores descargas de gás, as curvas de pressão aparentemente se sobrepõem na região do tubo de mistura e no difusor. Na câmara de abastecimento as pressões estáticas são negativas, embora próximas de zero. Esta ocorrência favorece a descida dos sólidos provenientes do silo.

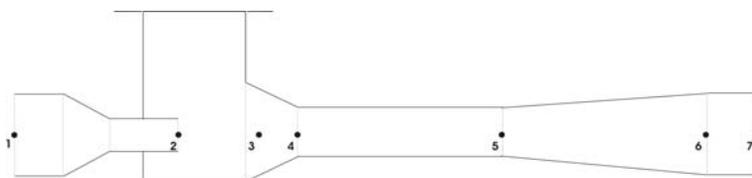
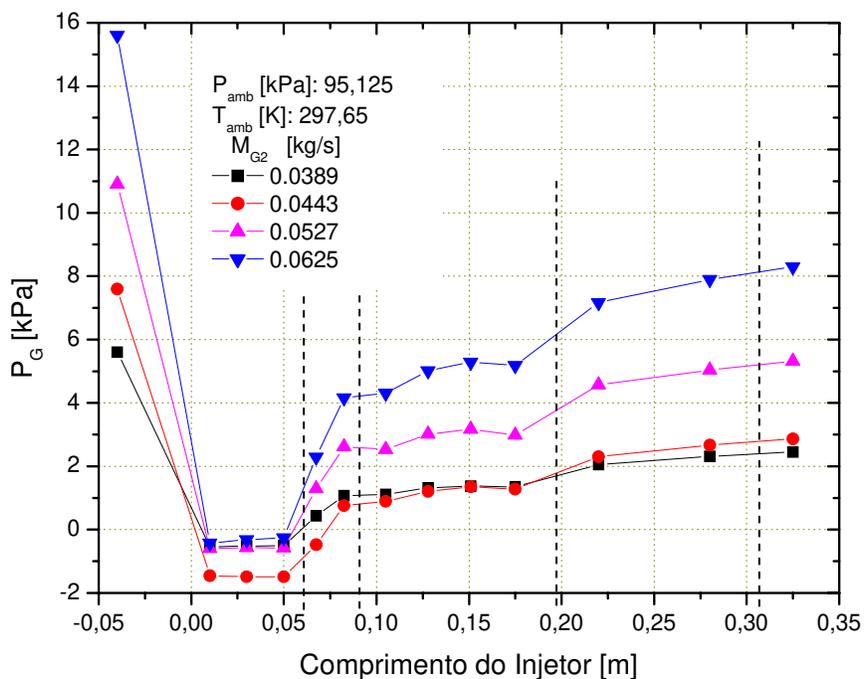


Figura 5.1 – Distribuição de Pressão do Gás dentro do Injetor,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

## 5.1.2 Escoamento da Mistura Ar - FCC

### A. Distribuição de Pressão ao Longo do Injetor

A Figura 5.2 apresenta a distribuição de pressão estática ao longo do injetor com a inserção de uma descarga média de  $0,0795kg/s$  de catalisador de FCC e descargas de ar variando de  $0,0389$  a  $0,0625 kg/s$ . Para efeito de comparação estão mostrados na Figura os dados de Bohnet (1985) para o escoamento de Polietileno, sob as mesmas condições do catalisador de FCC.

A Figura 5.2 mostra que, para o FCC, há um aumento da pressão na câmara de abastecimento, seguido por uma queda no bocal convergente e no tubo de mistura, e por um

aumento de pressão no difusor. O aumento da pressão na câmara de abastecimento ocorreu devido à desaceleração do gás na colisão com o particulado e à expansão do jato de gás. Este aumento é dependente da descarga de gás, pois quando esta é aumentada, a curva tende ao comportamento apresentado pelo escoamento monofásico, mostrado na Figura 5.1. Em nenhum dos testes com o FCC, que, como foi visto anteriormente, foram realizados num injetor de geometria igual à de Bohnet e Wagenknecht (1978), ocorreu uma recuperação de pressão no tubo de mistura, ao contrário do polietileno.

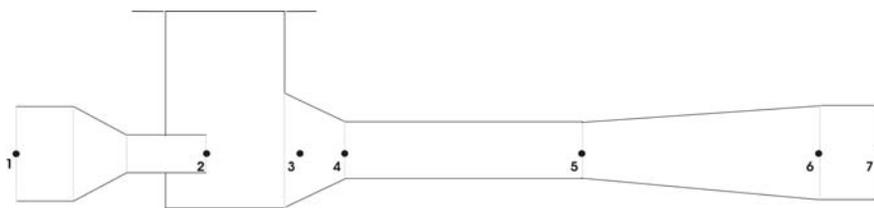
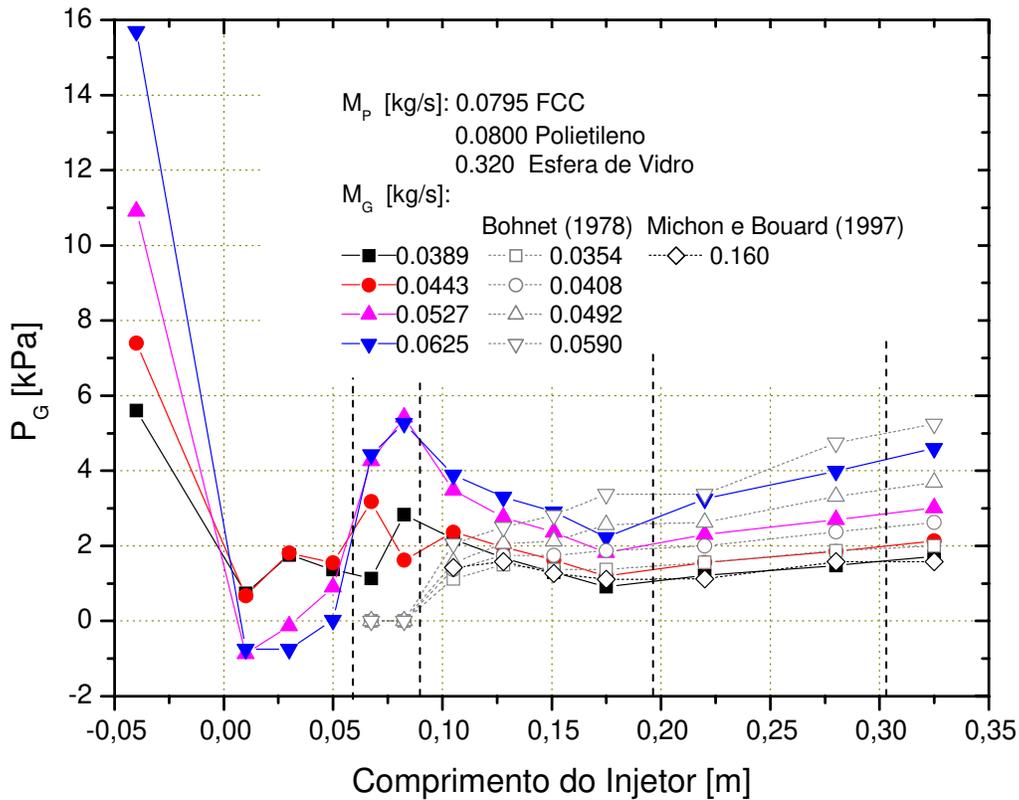


Figura 5.2 – Distribuição de Pressão da Mistura Gás-FCC no injetor,  $d_2 = 20,40mm$  e

$$S = 50,0mm$$

A diminuição de pressão no tubo de mistura na Figura 5.2, pode-se ser atribuída à hipótese de que o particulado no injetor ocupa parte da área da secção transversal reduzindo-a, promovendo o aumento da velocidade média do escoamento de gás. Outra hipótese pode ser a redução de arraste que, segundo Marcus, Dickson e Rallis (1976) e Fan e Zu (1998), é provocado por um conjunto de fatores, entre eles, pelo escoamento pulsante do gás, possivelmente ocasionado pela descida do FCC do silo e/ou pelo compressor e, pela diminuição da turbulência do escoamento gasoso devido à presença do sólidos, desde que  $\varphi \leq 2.2$ .

No difusor o comportamento da distribuição de pressão do FCC e do polietileno foi semelhante e o efeito da diferença de propriedades dos particulados pouco alterou os valores de pressão estática na saída do injetor, mesmo que pertencentes a classes distintas, A e D, respectivamente.

No trabalho de Michon e Bouard (1997), as condições dos testes foram diferentes,  $\dot{M}_{GT}$  e  $\dot{M}_p$  foram maiores do que as deste trabalho e do que as de Bohnet (1985), e a geometria do injetor utilizado não foi detalhada. Apesar disso, comparou-se os resultados de testes em que a carga de sólidos foi a mesma para o escoamento de esferas de vidro, FCC e polietileno. Notou-se uma sobreposição entre as curvas das esferas de vidro e FCC, ambas da mesma classe A de Geldart (1973).

No escoamento do FCC, a perda de pressão no tubo de mistura pode ser atribuída ao aumento da velocidade do gás, devido à diminuição da área da secção transversal, devido à presença de sólidos depositados na base do tubo de mistura, que também aumentam a queda de pressão por atrito. Já no difusor, a recuperação de pressão do gás ocorre devido à geometria, embora a recuperação seja menor que a do polietileno, pois se trata de um material de maior densidade, e que causa maior perturbação no escoamento gasoso.

## **B. Distribuição da Pressão na Câmara de Abastecimento**

A Figura 5.3 mostra a distribuição de pressão na câmara de abastecimento para o escoamento de FCC, região não está coberta pelos vários autores citados, a não ser por

Chellappan e Ramaiyan (1986) e Xiong, Zhang, e Yuan (2005). Os primeiros estudaram a distribuição de pressão na câmara de abastecimento sob o escoamento de trigo com  $\rho_p = 1328 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 3,8 \text{ mm}$ , para  $S$  igual a  $0,0 \text{ mm}$ ,  $8,0 \text{ mm}$  e  $18,0 \text{ mm}$ , ângulo de abertura do bocal convergente igual a  $15,7^\circ$  e  $\dot{M}_{GT} = 0,0294 \text{ kg/s}$ , sem mencionar o valor de  $\dot{M}_p$ . Xiong, Zhang, e Yuan (2005) realizaram seu estudo em um injetor com as dimensões:  $S = 130 \text{ mm}$ ,  $L_{34}$  não mencionado e ângulo de abertura do bocal convergente igual a  $15^\circ$ . O particulado estudado não foi identificado, sendo mencionadas somente suas propriedades:  $\rho_p = 2480 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 2,5 \text{ mm}$ , e sobre as condições do teste, a descarga de sólidos  $\dot{M}_p = 0,248 \text{ kg/s}$  e  $\dot{M}_{GT} = 0,840 \text{ kg/s}$ .

Mesmo com as diferenças citadas, que incluem diferentes geometrias de injetor, os valores obtidos nestes dois trabalhos para a distribuição de pressão apresentaram as mesmas tendências dos resultados obtidos com FCC. As curvas mostraram um aumento de pressão estática na direção do bocal convergente e que, para um dado ângulo de abertura (em torno de  $15^\circ$  no trabalho atual e nos trabalhos aqui referidos) este efeito é proporcional à descarga de gás.

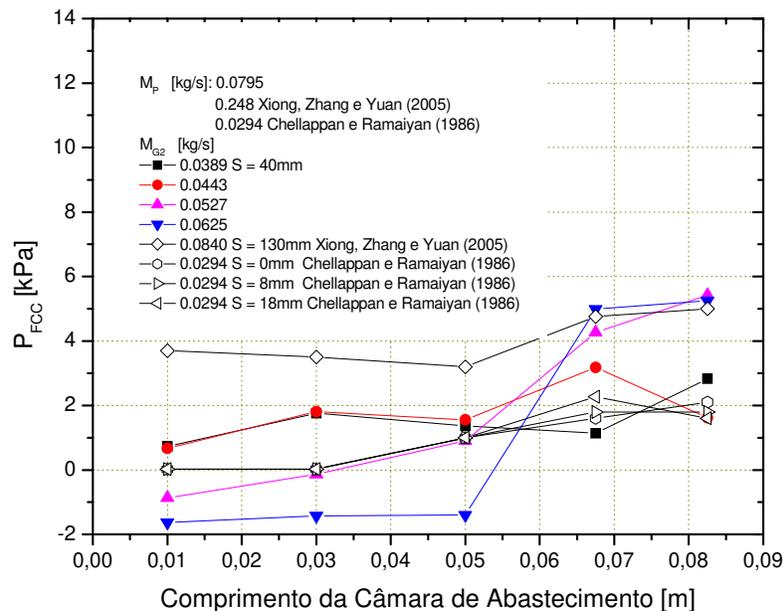


Figura 5.3 – Distribuição de Pressão na Câmara de Abastecimento,  $d_2 = 20,40 \text{ mm}$  e  $S = 50,0 \text{ mm}$

### C. Incorporando o Injetor em um Sistema de Transporte

A Figura 5.4 mostra a variação total de pressão no injetor para o escoamento só do gás e para o escoamento gás-sólido, com o injetor de geometria apresentada na Figura 4.2 e  $\dot{M}_p = 0,0795 \text{ kg/s}$ . A variação total de pressão no injetor, resultante dos testes, é função quadrática de  $\dot{M}_{GT}$  tanto para o escoamento do ar  $(p_{G2} - p_{G7})_G$  quanto para o escoamento de ar transportando sólido particulado  $(p_{G2} - p_{G7})_P$ .

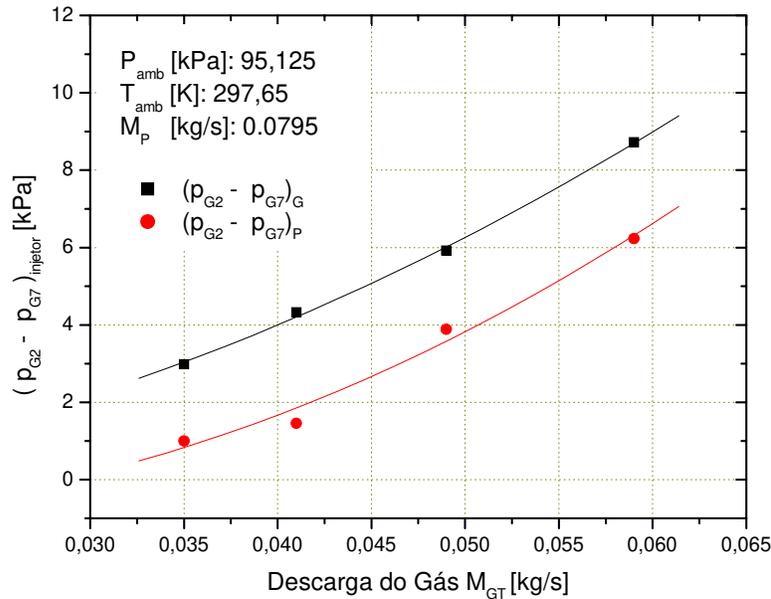
As curvas de  $(p_{G2} - p_{G7})_G$  e  $(p_{G2} - p_{G7})_P$  como função de  $\dot{M}_{GT}$  são:

$$-(p_{G2} - p_{G7})_G = 2299,14\dot{M}_{GT}^2 + 19,47\dot{M}_{GT} - 0,46 \quad (5.1)$$

e

$$-(p_{G2} - p_{G7})_P = 3204,05\dot{M}_{GT}^2 - 72,74\dot{M}_{GT} - 0,55 \quad (5.2)$$

onde o sinal negativo indica que houve aumento de pressão do escoamento ao atravessar o injetor.



5.4 – Diferença de Pressão no Injetor versus Descargas de Ar e FCC,  $d_2 = 20,40 \text{ mm}$  e

$$S = 50,0 \text{ mm}$$

Na Figura 5.4 observa-se que há uma diferença constante entre as curvas de  $(p_{G2} - p_{G7})_G$  e  $(p_{G2} - p_{G7})_P$  para qualquer valor de  $\dot{M}_{GT}$ . Isto indica que basta levantar a curva de variação total de pressão para o ar e um teste com a mistura Ar + FCC de interesse, apenas para uma descarga de ar, para gerar a curva de variação total de pressão do escoamento gás sólido de interesse, paralela à curva do ar. Esta curva, juntamente com as curvas para as demais partes do sistema de transporte, permite a especificação do compressor necessário.

#### D. Efeito da Carga de Sólidos na Distribuição de Pressão

Ao analisar as curvas de distribuição de pressão em função da carga de sólidos,  $\varphi$ , notou-se que elas ficam mais próximas com o aumento de  $\varphi$ , conforme é mostrado nas Figuras 5.5 a 5.9, para  $\varphi$  variando de 0,773 a 2,15. Observou-se também que, com o aumento de  $\varphi$ , a perda de pressão aumentou, isto é, o aumento total de pressão diminuiu.

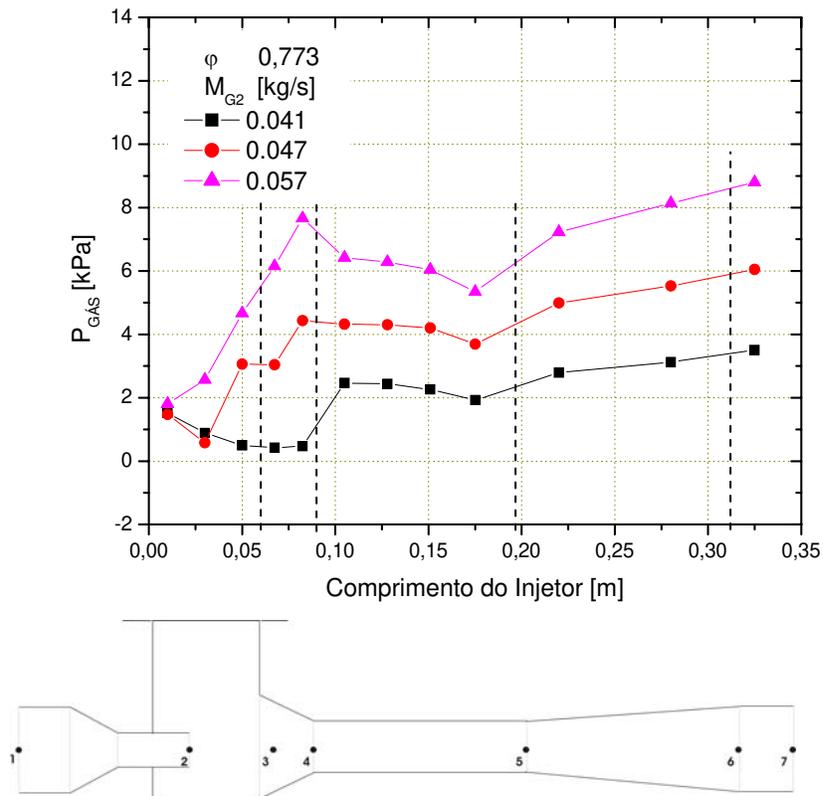


Figura 5.5 – Distribuição de Pressão no Injetor com  $\varphi = 0,773$ ,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

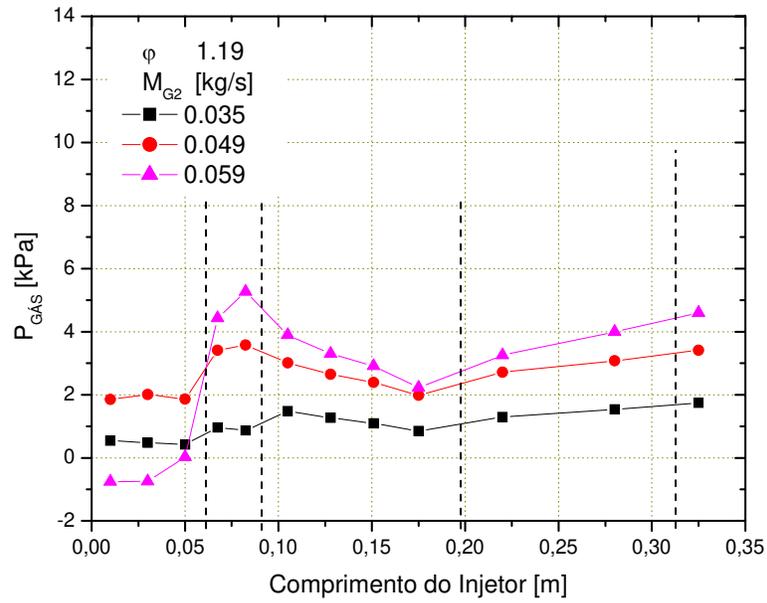


Figura 5.6 – Distribuição de Pressão no Injetor com  $\phi = 1,19$ ,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

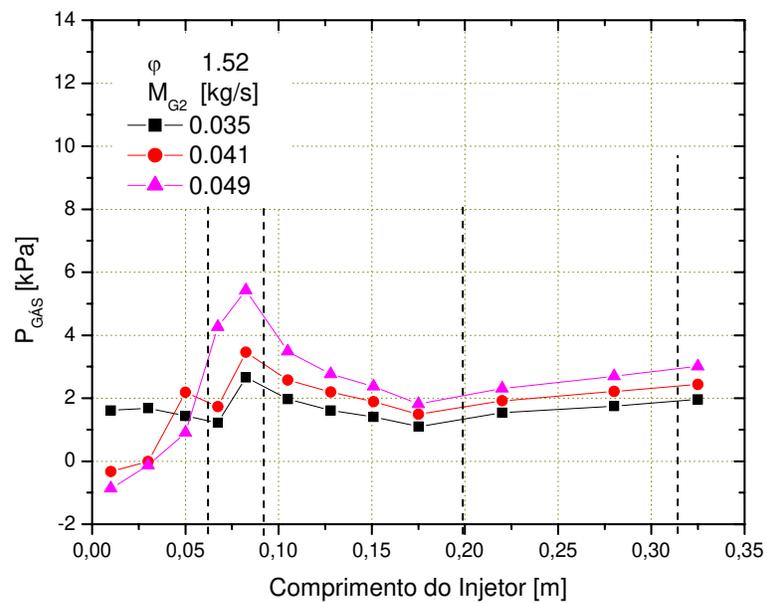
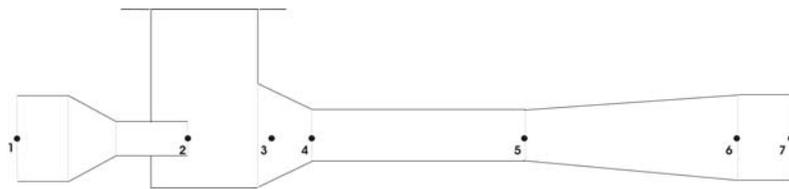


Figura 5.7 – Distribuição de Pressão no Injetor com  $\phi = 1,52$ ,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

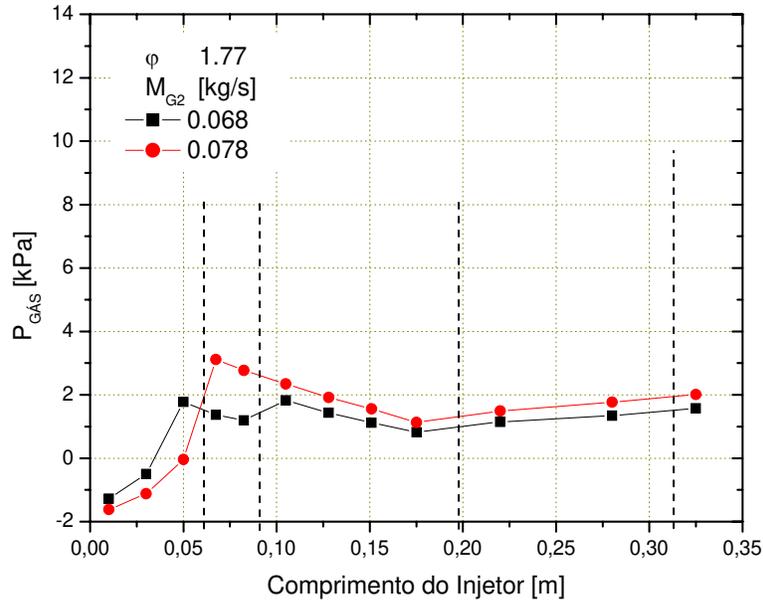


Figura 5.8 – Distribuição de Pressão no Injetor com  $\phi = 1,77$ ,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

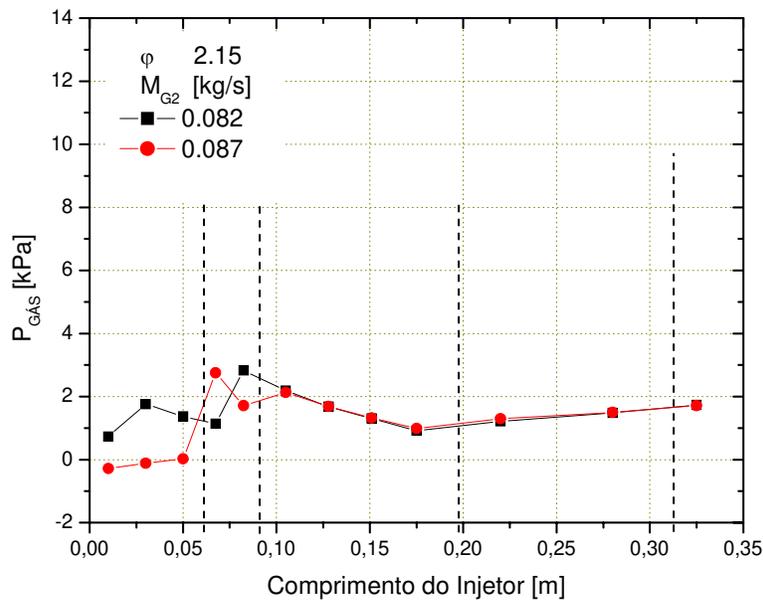
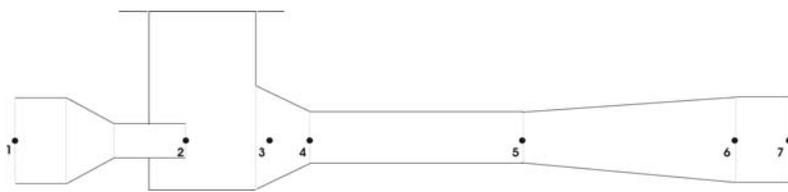


Figura 5.9 – Distribuição de Pressão no Injetor com  $\phi = 2,15$ ,  $d_2 = 20,40mm$  e  $S = 50,0mm$

## 5.2 Efeito da Geometria do Injetor na Distribuição de Pressão

Chellapam (1985) estudou o efeito do parâmetro geométrico  $S$  na carga de sólidos na câmara de abastecimento. A proposta do presente teste foi verificar como a variação de  $S$  influencia a distribuição de pressão no injetor no caso do FCC e, adicionalmente, estudar a influência do diâmetro do bocal de entrada do ar,  $d_2$ , ambos com  $\dot{M}_{GT} = 0,35 \text{ kg/s}$  e  $\dot{M}_p = 0,08 \text{ kg/s}$ .

A Tabela 5.1 mostra a variação de pressão obtida nas partes do injetor:

Tabela 5.1 – Diferença de Pressão nas Partes do Injetor em Função de  $S$  e  $d_2$  para o Ar

Câmara de Abastecimento - [Pa]			
S	d2 [mm]		
	12,64	15,98	20,40
10,00	393,45	-3480,29	-979,63
30,00	816,87	-3607,86	-582,09
50,00	369,94	-2493,30	-164,22
Tubo de Mistura - [Pa]			
S	d2 [mm]		
	12,64	15,98	20,40
10,00	-3386,10	-1896,19	538,35
30,00	-1911,56	-612,12	-361,90
50,00	-1868,56	-181,82	1770,48
Difusor - [Pa]			
S	d2 [mm]		
	12,64	15,98	20,40
10,00	-697,97	-650,84	-518,27
30,00	-771,07	-614,62	-361,53
50,00	-697,97	-568,42	-444,71

enquanto as condições de compressibilidade do gás em  $d_2$  nos testes realizados estão mostradas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Número de Mach em  $d_2$

S [mm]	Gás	FCC
<b><math>d_2 = 12.64\text{mm}</math></b>		
10,0	0,846	0,776
30,0	0,828	0,768
50,0	0,816	0,761
<b><math>d_2 = 15.98\text{mm}</math></b>		
10,0	0,500	0,508
30,0	0,496	0,491
50,0	0,494	0,512
<b><math>d_2 = 20.40\text{mm}</math></b>		
10,0	0,291	0,293
30,0	0,300	0,291
50,0	0,289	0,285

### 5.2.1 Efeito do Diâmetro do Bocal de Entrada de Ar

As Figuras 5.10 - 5.12 mostram o efeito da variação de  $S$  para diferentes valores de  $d_2$ , num escoamento apenas de ar.

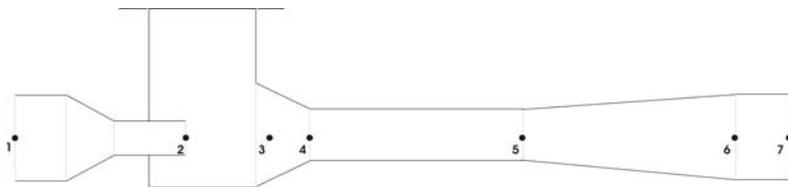
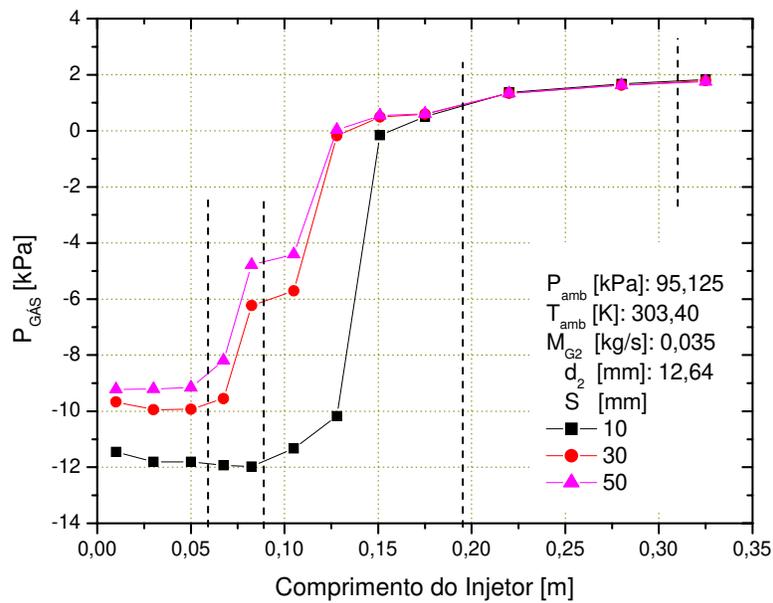


Figura 5.10 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para  $d_2 = 12,64\text{mm}$  e  $S$  variável

A Figura 5.10 apresenta a distribuição da pressão no escoamento de gás com  $d_2 = 12,64mm$ . Nas condições deste teste o escoamento apresenta em média Mach  $\approx 0,82$  ao atravessar  $d_2$ . As curvas indicam uma elevada depressão na câmara de abastecimento e parte do tubo de mistura, seguida de uma repentina elevação de pressão na metade do tubo de mistura. A utilização de altas descargas de gás e baixos valores de  $d_2$  pode promover escoamentos transônicos, caracterizados por instabilidades ao redor de Mach  $\approx 1,00$ , que induzem um choque. Neste caso a diminuição de pressão estática logo após a câmara de abastecimento, onde o jato de gás começa a se expandir, indica um aumento de velocidade seguido de um choque, que conduziu o escoamento ao regime subsônico novamente.

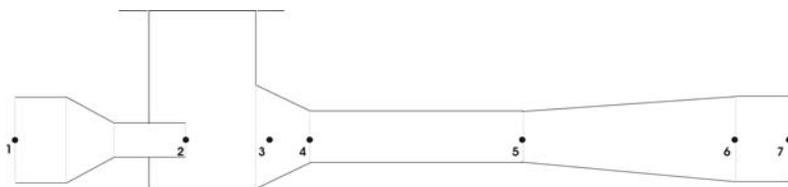
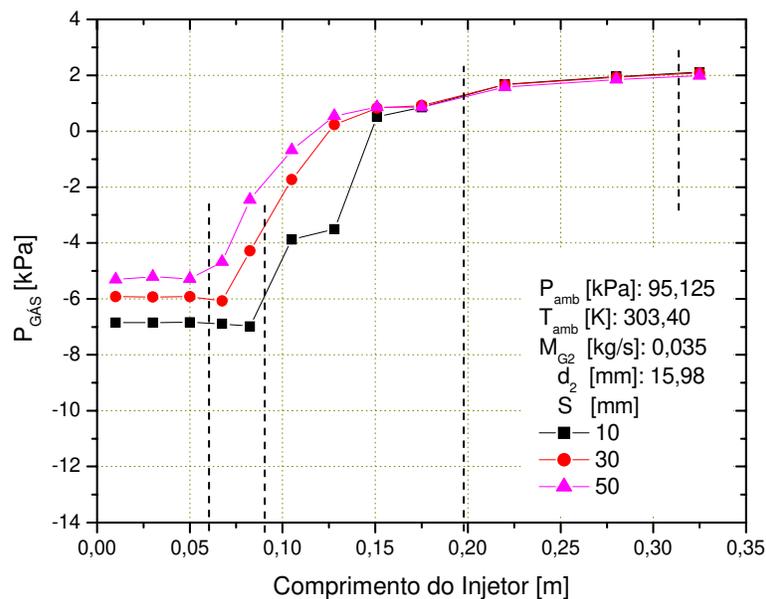


Figura 5.11 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para  $d_2 = 15,98mm$  e  $S$  variável

A Figura 5.11 apresenta a distribuição de pressão do escoamento de gás com  $d_2 = 15,98mm$ . Nas condições deste teste o escoamento apresenta em média Mach  $\approx 0,5$  ao

atravessar  $d_2$ . O escoamento é subsônico. Pode-se observar que o aumento total de pressão no injetor com  $d_2 = 15,98\text{ mm}$  é menor do que com  $d_2 = 12,64\text{ mm}$ .

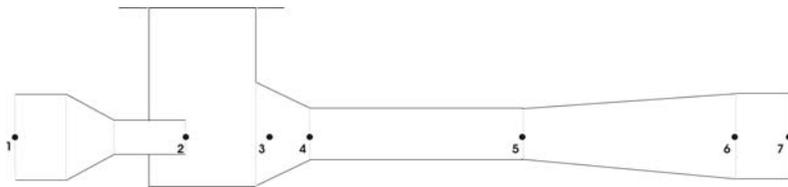
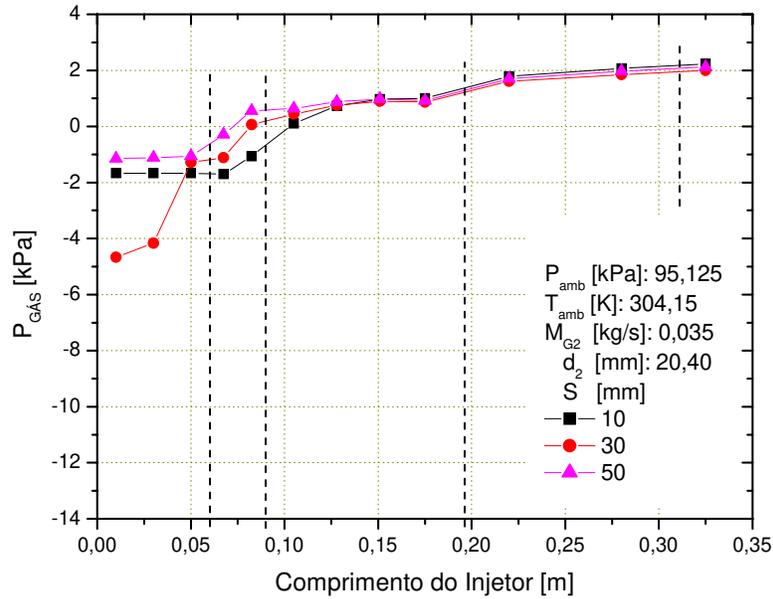


Figura 5.12 – Variação de Pressão do Gás ao longo do Injetor para  $d_2 = 20,40\text{ mm}$  e  $S$  variável

A Figura 5.12 apresenta a distribuição de pressão do escoamento de gás com  $d_2 = 20,40\text{ mm}$  e  $\text{Mach} \approx 0.3$ . Verificou-se uma redução considerável no aumento total de pressão no injetor comparado aos outros diâmetros testados.

As Figuras 5.10 - 5.12 mostram que do final do tubo de mistura em diante, o escoamento gasoso não sente o efeito das modificações geométricas realizadas em  $d_2$ . Isto ficou evidenciado pela sobreposição das curvas de distribuição de pressão nesta região para os diferentes valores de  $d_2$ .

Ao comparar as Figuras 5.10 - 5.12 com a Figura 5.1, notou-se que houve um aumento total de pressão no injetor nos dois casos, porém de forma diferente. Na Figura 5.1 ao manter  $d_2$  constante e aumentar  $\dot{M}_{GT}$  as curvas de distribuição de pressão mantiveram os mesmos valores na câmara de abastecimento e o aumento de pressão ocorreu à jusante desta região, já nas Figuras 5.10 - 5.12 ao manter  $\dot{M}_{GT}$  constante e diminuir  $d_2$  as curvas de distribuição de pressão mantiveram os mesmos valores no difusor e o aumento de pressão ocorreu a montante desta região. Outra constatação foi que, à medida que se diminui  $S$ , mais baixos são os valores de pressão na câmara de abastecimento e no tubo de mistura.

As Figuras 5.13-5.15 mostram a distribuição da pressão ao longo do injetor quando se variam os parâmetros  $S$  e/ou  $d_2$  num escoamento da mistura Ar + FCC.

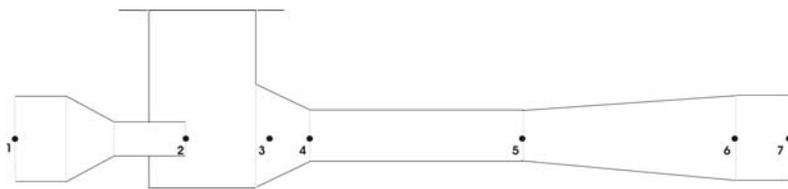
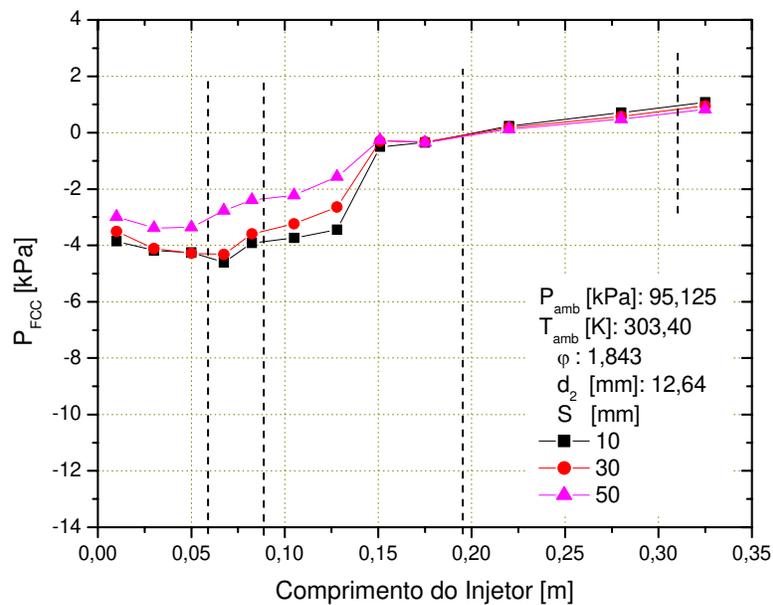


Figura 5.13 – Variação de Pressão da Mistura ao longo do Injetor para  $d_2 = 12,64mm$  e  $S$  variável

A Figura 5.13 mostra a distribuição de pressão no escoamento gás-sólido com  $d_2 = 12,64mm$ . Observou-se que, com a inclusão do particulado no escoamento de ar, as curvas apresentaram um aumento menor da pressão em relação ao escoamento monofásico. Atribui-se isso ao fato de que parte da energia contida no escoamento gasoso agora é utilizada para acelerar o particulado e o gás proveniente do silo. O escoamento inicia sua entrada no injetor perdendo pressão até a ocorrência de um choque caracterizado pela inversão de comportamento na curva de pressão estática na câmara de abastecimento.

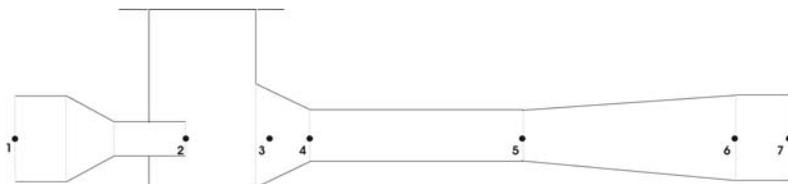
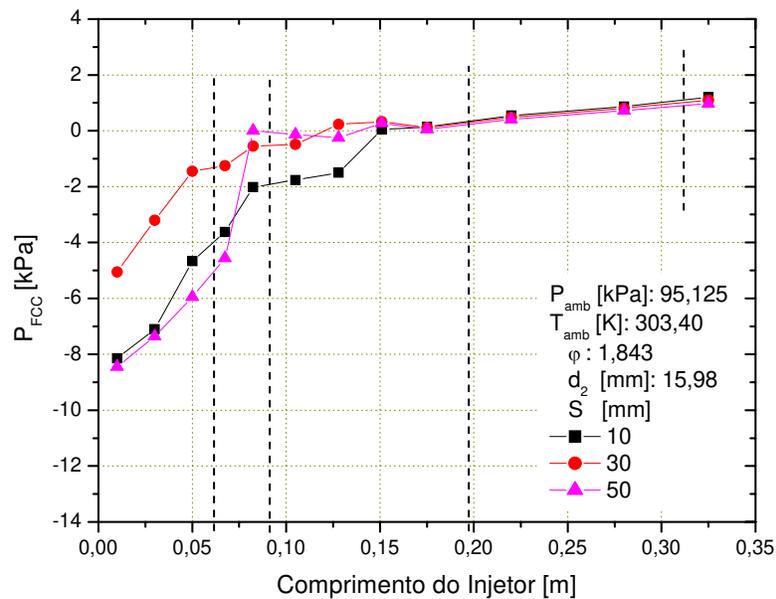


Figura 5.14 – Variação de Pressão da Mistura ao longo do Injetor para  $d_2 = 15,98mm$  e  $S$  variável

A Figura 5.14 apresenta a distribuição de pressão do escoamento gás-sólido com  $d_2 = 15,98 mm$ . Neste caso o padrão muda em relação às curvas vistas até o momento. As curvas apresentam um aumento crescente da pressão ao longo do injetor, exceto ao final do tubo de mistura. Esta configuração foi a que apresentou maior variação total de pressão no injetor, com o

gás transferindo energia para o particulado desde a seção 2, além de apresentar os valores mais negativos de pressão na câmara de abastecimento.

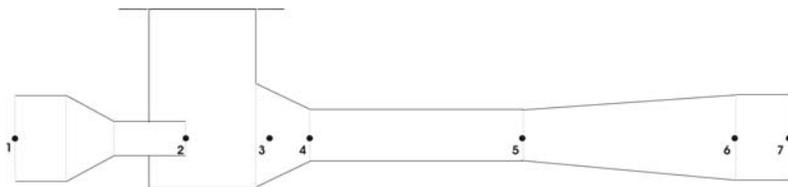
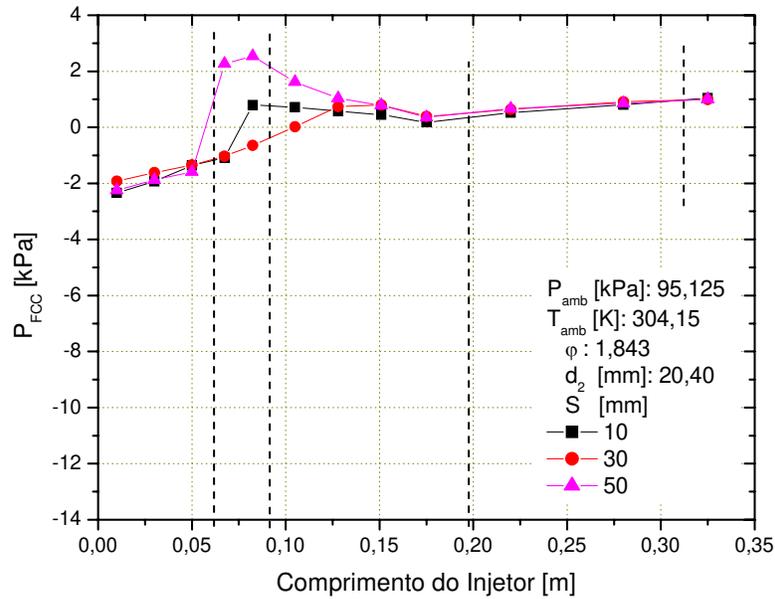


Figura 5.15 – Variação de Pressão da Mistura ao longo do Injetor para  $d_2 = 20,40\text{mm}$  e  $S$  variável

A Figura 5.15 apresenta a distribuição de pressão do escoamento gás-sólido com  $d_2 = 20,40\text{mm}$ . O aumento da pressão na câmara de abastecimento se dá devido à baixa velocidade do gás e à colisão com os sólidos. A utilização deste diâmetro mostrou que baixas velocidades do gás promovem quedas de pressão já no início do tubo de mistura.

### 5.2.2 Efeito da Posição do Bocal de Entrada de Ar

Ao analisar as Figuras 5.10 - 5.12, referentes ao escoamento só de gás, observou-se que à medida que se aumenta  $S$ , mais próximo da câmara de abastecimento começa o processo de aumento da pressão. Também foi observado que quanto maior for  $S$ , maiores são os valores de pressão estática na câmara de abastecimento.

A Figura 5.13 apresenta a distribuição de pressão no escoamento gás-sólido, para  $d_2 = 12,64\text{mm}$ . Assim como ocorreu com o escoamento só do gás, notou-se que a pressão tornou-se menos negativa na câmara de abastecimento, com o aumento de  $S$ . A distribuição de pressão estática no difusor é a mesma para os três valores de  $S$ , o que mostra que a variação de  $S$  não influencia a distribuição de pressão estática nesta região.

Na Figura 5.14, com  $d_2 = 15,98\text{ mm}$ , a depressão na câmara de abastecimento foi maior do que quando  $d_2 = 12,64\text{mm}$ . A distribuição de pressão estática no difusor é a mesma para os três valores de  $S$ , como no caso anterior.

Durante os testes mostrados na Figura 5.15, com  $d_2 = 20,40\text{ mm}$  e  $\varphi = 1,843$ , como nos dois casos acima, constatou-se uma restrição no equipamento. A área livre para receber e escoar o particulado entre  $d_2$  e  $d_4$  foi pequena para  $S = 10,0\text{mm}$  e isto dificultou o escoamento do particulado. No entanto isto pouco afetou os valores da curva de distribuição de pressão, pois ao comparar a curva de  $S = 10,0\text{mm}$  com as curvas para  $S = 30,0$  e  $50,0\text{mm}$ , nas quais o particulado escoou livremente, observou-se que mantiveram o mesmo padrão inclusive assumindo os mesmos valores de pressão no difusor assim como aconteceu nas outras duas configurações geométricas acima. Também se observou que neste caso a variação de  $S$  não influenciou a distribuição de pressão na câmara de abastecimento.

### 5.3 Coeficientes de Perda de Pressão

Os coeficientes de perda de pressão no escoamento gasoso são proporcionais à relação entre a diferença de pressão e a velocidade média do escoamento, tal que:  $K \propto \Delta p / \rho_G u_G^2$ . No

entanto, para a mistura gás-sólido os valores de pressão estática não são mais influenciados somente pela variação de geometria ou pelo atrito, pois a quantidade de sólidos no escoamento passa a afetar a distribuição de pressão e, conseqüentemente,  $K$ .

A Figura 5.16 apresenta os valores de  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  em função da carga de sólidos  $\varphi$ , para  $d_2 = 12,64\text{ mm}$  e  $S$  variável. Observa-se que  $K_{24}$  e  $K_{57}$  praticamente não variaram com  $\varphi$  e nem com  $S$ ;  $K_{45}$  também manteve-se constante com  $\varphi$  para  $S = 30,0$  e  $50,0\text{ mm}$ . Para  $S = 10,0\text{ mm}$  assumiu uma tendência decrescente e negativa com  $\varphi$ , indicando que o recuperação de pressão diminui com o aumento da carga de sólidos.

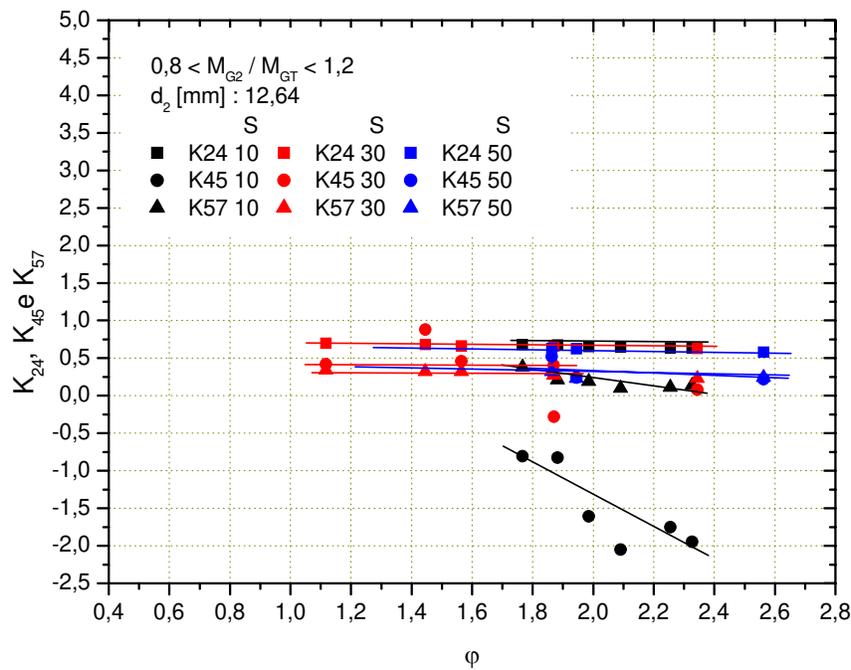


Figura 5.16 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos  $\varphi$  para  $d_2 = 12,64\text{ mm}$ .

A Figura 5.17 apresenta  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  em função de  $\varphi$  para  $d_2 = 15,98\text{ mm}$ . Assim como na Figura 5.16,  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  mantiveram-se constantes, e novamente  $K_{45}$  variou com  $S$ . Neste caso para  $S = 10,0\text{ mm}$ , os valores de  $K_{45}$  são negativos indicando que houve recuperação de pressão e para  $S = 50,0\text{ mm}$  os valores de  $K_{45}$  são positivos assim como  $K_{24}$  e  $K_{57}$ , porém com valores mais altos indicando maior perda de pressão no tubo de mistura.

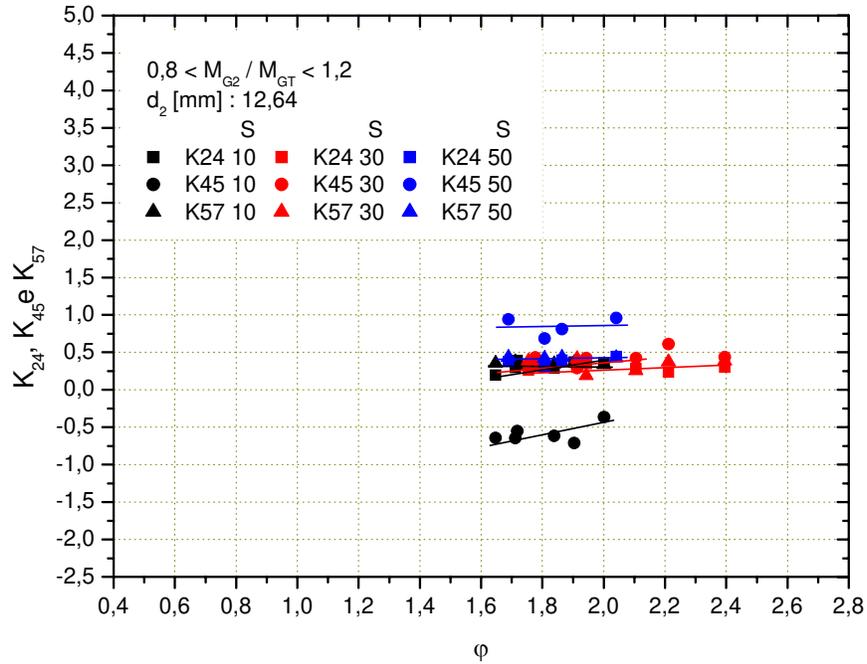


Figura 5.17 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos  $\phi$  para  $d_2 = 15,98$  mm.

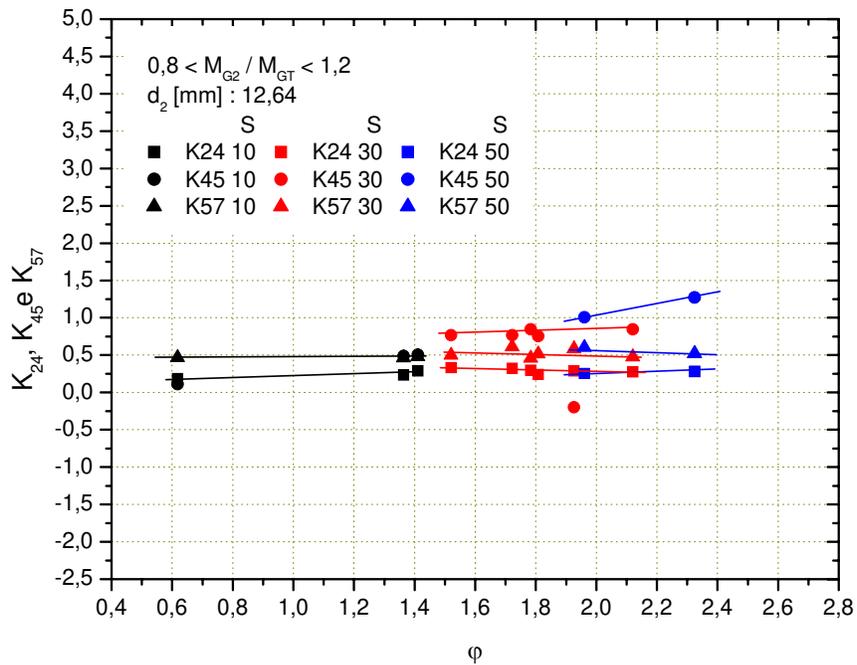


Figura 5.18 – Coeficiente de Perda de Pressão para o FCC em função da Carga de Sólidos  $\phi$  para  $d_2 = 20,40$  mm.

A Figura 5.18 mostra  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  em função de  $\varphi$  para  $d_2 = 20,40\text{ mm}$ .  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  não sofreram influência de  $\varphi$ , exceto  $K_{45}$  para  $S = 50,0\text{ mm}$  que apresentou uma tendência crescente.

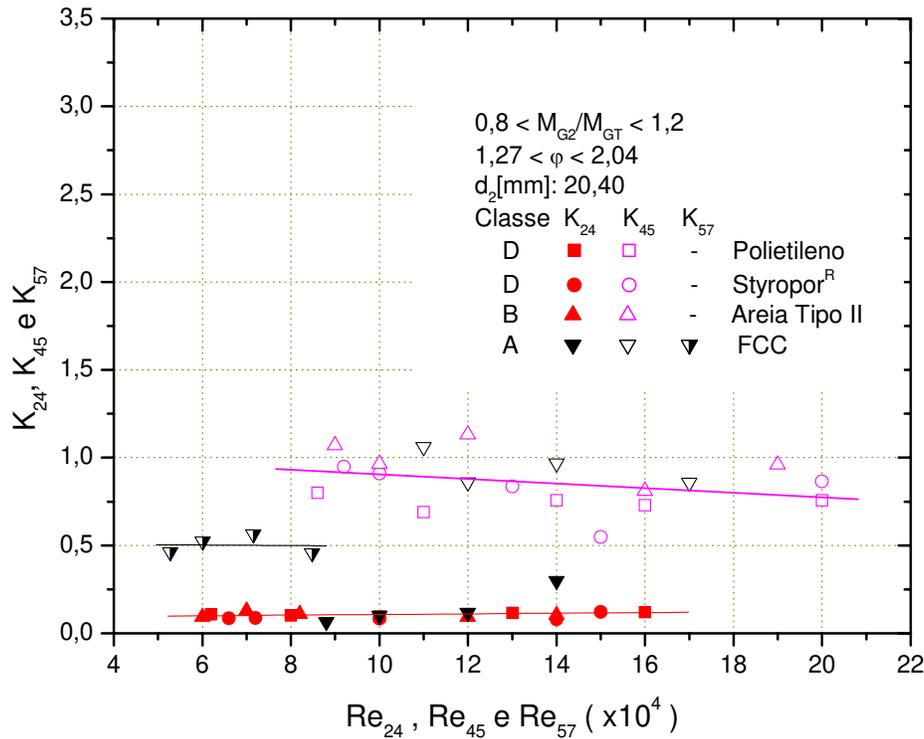


Figura 5.19 – Coeficientes de Perda de Pressão  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  para  $d_2 = 20,40\text{ mm}$ .

A Figura 5.19 apresenta os valores dos coeficientes de perda de pressão na câmara de abastecimento do injetor,  $K_{24}$ , e no tubo de mistura,  $K_{45}$ , em função de  $Re$ , obtidos a partir dos dados apresentados por Bohnet (1985) e neste trabalho. Os dados da figura são válidos para uma condição especial de operação, conforme indicado por Bohnet (1985), onde  $0,8 \leq \dot{M}_{G2}/\dot{M}_{GT} \leq 1,2$ , que corresponde à utilização dos injetores em muitos casos práticos.

Nesta figura os valores dos coeficientes da transformação de energia cinética em pressão apresentados no trabalho de Bohnet (1985), foram transformados em termos de  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  com o intuito de verificar se os diferentes materiais testados apresentariam um comportamento comum.

Isto foi confirmado, exceto por  $K_{57}$ , que, de acordo com a hipótese de Bohnet (1985) de que a recuperação no difusor é máxima, vale  $K_{57} \cong 0$ , a priori.

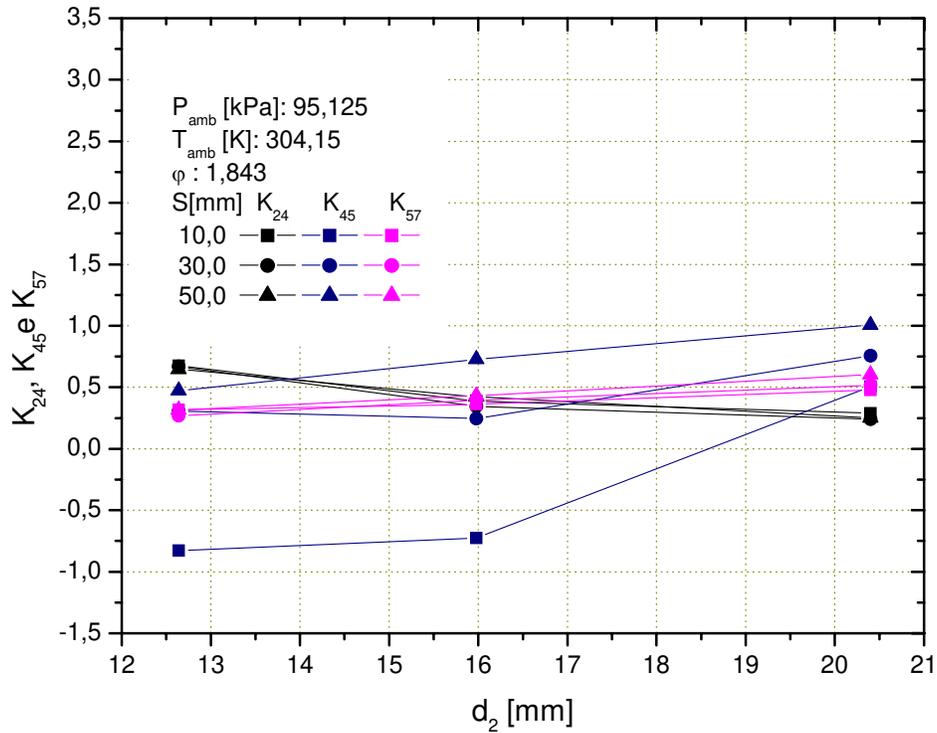


Figura 5.20 – Coeficientes de Perda de Pressão  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  para o FCC em função de  $d_2$ .

Na literatura disponível não existe um estudo de como  $S$  e  $d_2$  influenciam os valores de  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$ . Os dados obtidos neste trabalho para FCC, mostram  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  na Figura 5.20 em função de  $d_2$ , para  $\varphi = 1,843$ . Como se pode observar, basicamente só  $K_{45}$  varia com  $d_2$ , os demais coeficientes sendo praticamente invariáveis.

## Capítulo 6

### Procedimento para o Cálculo de Injetores

Deseja-se dimensionar um injetor a ser instalado em uma linha de 50 mm de diâmetro para uma descarga de sólidos de 180 kg/h. O sólido é o polietileno, para o qual  $\rho_p = 918 \text{ kg/m}^3$  e  $d_p = 3 \text{ mm}$ . O gás é o ar e as condições de teste são atmosféricas. O silo é fechado, impossibilitando a entrada de ar atmosférico. Determinar:

- A descarga de gás necessária;
- A variação de pressão global no injetor;
- A potência do soprador.

Adotar a simplificação de que não há variação da densidade do gás devido às variações de pressão e temperatura, que são pequenas. A pressão manométrica na linha é 16 kPa.

#### **Passo 1: Determinação dos Diâmetros e Comprimentos do Injetor**

##### **- Primeira Tentativa de Projeto**

As dimensões iniciais serão especificadas a partir de algumas recomendações de Chellappan e Ramaiyan (1986). Embora elas tenham sido obtidas para escoamento de trigo (Classe D), serão utilizadas apenas estabelecer uma primeira geometria tentativa, que permite a obtenção da ordem de grandeza das velocidades envolvidas, e se elas são adequadas para o transporte do sólido particulado.

O diâmetro de saída do difusor é admitido igual ao do duto de transporte, isto é,  $d_6 = d_7 = 0,050m$ .

O ângulo do difusor é admitido igual a  $8^\circ$  para maximizar a descarga de sólidos.

A expressão para o diâmetro de saída  $d_5$  do tubo de mistura:

$$d_5 = d_6 - 2L_{56} \operatorname{tg} 4^\circ \quad (6.1)$$

pode ser obtida de uma análise da geometria do difusor.

Supondo o comprimento do difusor  $L_{56} = 0,100m$ , resulta:

$$\begin{aligned} d_5 &= 0,050 - 2 \cdot 0,100 \cdot 0,035 \\ &= 0,036m \end{aligned}$$

O diâmetro de entrada do tubo de mistura é o mesmo da saída do tubo, isto é,  $d_4 = d_5$ ; logo  $d_4 = 0,036m$ .

O ângulo do bocal convergente para maximizar a descarga de sólidos é admitido como  $30^\circ$  então:

$$d_3 = d_4 + 2L_{34} \operatorname{tg} 15^\circ \quad (6.2)$$

Supondo o comprimento do bocal  $L_{34} = 0,03m$ :

$$\begin{aligned} d_3 &= 0,036 + 2 \cdot 0,03 \cdot 0,268 \\ &= 0,052m \end{aligned}$$

Segundo Kmiec e Leschonski (1991) o jato de gás se expande radialmente com 4° de abertura; Bohnet e Wagenknecht (1978) mencionam 5°. Segundo Bohnet (1985) o jato de gás se expande até dentro do tubo de mistura.

Com base em Chellappan e Ramaiyan (1986) e nas demais informações levantadas, a distância  $S$  é admitida igual a  $15\text{ mm}$ . O exame da geometria mostra que o diâmetro da entrada do ar na câmara de abastecimento pode ser calculado por:

$$d_2 = d_5 - 2\left(S + L_{34} + \frac{L_{45}}{2}\right)\text{tg}4,5^\circ \quad (6.3)$$

Daí,

$$\begin{aligned} d_2 &= 0,036 - 2 \cdot 0,95 \cdot 0,0787 \\ &= 0,021\text{m} \end{aligned}$$

Resumindo, os diâmetros e comprimentos adotados inicialmente são:

$$\begin{aligned} d_7 &= 0,050\text{m} ; d_6 = 0,050\text{m} ; d_5 = 0,036\text{m} ; d_4 = 0,036\text{m} ; d_3 = 0,052\text{m} ; d_2 = 0,021\text{m} ; \\ d_1 &= 0,05\text{m} \end{aligned}$$

$$L_{67} = 0,030\text{m} ; L_{56} = 0,100\text{m} ; L_{45} = 0,100\text{m} ; L_{34} = 0,030\text{m} ; S = 0,015\text{m}$$

## **Passo 2: Cálculo da Descarga de Gás Mínima Necessária**

O cálculo da descarga de gás mínima necessária pode ser feita a partir da equação:

$$\dot{M}_{GT} = \rho_{G7} u_{G7} \pi \frac{d_7^2}{4},$$

onde  $\rho_{GT} = 1,225 \text{ kg/m}^3$  e  $d_7 = 0,050 \text{ m}$

Para calcular a velocidade do gás é utilizada em  $d_7$  a Eq. (3.55), na qual é admitido que a velocidade da partícula é igual à velocidade de saltação do gás,  $u_p = u_s$ , dessa maneira garantindo que a velocidade média do gás encontrada seja suficiente para o transporte da partícula.

Aplicando a Eq. (3.55):

$$u_s \frac{du_s}{dx} = -g \left( \frac{u_G - u_s}{u_s} \right)^2 + g \frac{u_s^2}{2} \frac{f}{d_i} + g\beta$$

vem:

$$u_{G7} = u_s \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{u_s^2}{2} \frac{f}{d_7} + \beta \right)} \right)$$

Admitindo que  $f = 0,003$  e  $\beta = 0,4$ , conforme proposto por Bohnet (1985), e que a velocidade de saltação pode ser calculada pela Eq. (3.54), a partir de:

$$\dot{M}_p = 0,05 \text{ kg/s}$$

$$d_p = 0,003 \text{ m}$$

$$\rho_p = 918 \text{ kg/m}^3$$

tem-se:

$$\begin{aligned} u_s &= 2,8 \cdot 0,05^{0,1} \cdot 0,050^{0,428} \cdot 0,003^{-0,023} \cdot 918^{0,306} \cdot 1,225^{-0,405} \\ &= 4,93 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Substituindo obtém-se a velocidade do gás:

$$u_{G7} = 4,93 \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{4,93^2 \cdot 0,0035}{2 \cdot 0,05} + 0,4 \right)} \right) = 10,45 \text{ m/s}$$

Portanto, a descarga mínima de gás vale:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{GT} &= \rho_{G7} u_{G7} \pi \frac{d_7^2}{4} \\ &= 1,225 \cdot 10,45 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,05^2}{4} \end{aligned}$$

$$\dot{M}_{GT} = 0,0251 \text{ kg/s}$$

Como o silo é fechado, a descarga de gás através da seção de entrada de gás do injetor é a mesma que atravessa a seção de saída, na mistura gás-sólido, assim,  $\dot{M}_{G2}/\dot{M}_{GT} = 1$  e  $\dot{M}_{G2} = 0,0251 \text{ kg/s}$

A carga de sólidos vale  $\frac{\dot{M}_P}{\dot{M}_{GT}} = \frac{0,05}{0,0251} = 2,0 \text{ kg}_P/\text{kg}_G$

### **Passo 3: Verificação das Velocidades do Gás e das Partículas no Injetor**

O objetivo da verificação é determinar se a velocidade do gás se mantém acima da velocidade de saltação ao longo de todo injetor, para haver o transporte pneumático. Esta determinação pode ser feita pela equação da conservação da massa, assumindo, como foi dito inicialmente, que o escoamento é incompressível.

Assim:

$$\begin{aligned}
 0,0251 &= \rho_{G5} u_{G5} \pi \frac{d_5^2}{4} \\
 &= 1,225 \cdot u_{G5} \cdot 3,14 \cdot \frac{0,036^2}{4}
 \end{aligned}$$

Daí:

$$u_{G5} = 20,14 \text{ m/s}$$

Analogamente:

$$u_{G2} = 59,18 \text{ m/s}$$

Para verificar se a velocidade do gás é capaz de transportar o particulado, compara-se com a velocidade de saltação na seção, que pode ser obtida pela Eq. (3.54).

Assim, na seção 5,  $d_5 = 0,036 \text{ m}$ , e:

$$\begin{aligned}
 u_s &= 2,8 \cdot 0,05^{0,1} \cdot 0,036^{0,428} \cdot 0,003^{-0,023} \cdot 918^{0,306} \cdot 1,225^{-0,405} \\
 &= 4,24 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Daí:

$$u_{G5} > u_s$$

Analogamente, para  $d_2 = 0,021 \text{ m}$ :

$$\begin{aligned}
 u_s &= 2,8 \cdot 0,05^{0,1} \cdot 0,021^{0,428} \cdot 0,003^{-0,023} \cdot 918^{0,306} \cdot 1,225^{-0,405} \\
 &= 3,37 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

de onde se verifica que:

$$u_{G2} > u_s$$

Como as velocidades do gás foram verificadas maiores que a velocidade de saltação, conclui-se que o particulado pode ser acelerado com a geometria do injetor calculada. Eventualmente, se isto não ocorrer, podem ser necessários alguns ajustes na geometria do injetor. Como sugestão, não diminuir excessivamente  $d_2$ , pois aumenta a queda de pressão na linha e, conseqüentemente, o aumento do consumo energético do compressor. Os parâmetros  $S$ ,  $L_{45}$  e o ângulo de expansão do jato de gás poderão ser modificados, porém com a recomendação de que sejam feitas pequenas modificações em torno dos valores já apresentados na literatura.

Agora, utilizando o programa apresentado no Apêndice D, calculam-se as velocidades do particulado:

$$u_{p4} = 5,04 m/s, u_{p5} = 8,23 m/s \text{ e } u_{p7} = 10,51 m/s$$

#### **Passo 4: Cálculo de Parâmetros do Escoamento Gás-Sólido**

Para a aplicação das equações de variação de pressão na Câmara de Abastecimento e no Tubo de Mistura, é necessário calcular os parâmetros adimensionais abaixo, como foi visto nas Seções (3.3) e (3.4):

$$u_{G24} = 41,82 m/s$$

$$u_{G45} = 31,53 m/s$$

e

$$d_{G24} = 0,0257 m$$

$$d_{G45} = 0,0295 m$$

e

$$Fr_{G45} = \frac{u_{G45}^2}{gd_{G45}} = 3438,7$$

$$Re_{G45} = \frac{\rho_{G45}u_{G45}d_{G45}}{\mu} = 63300,8$$

$$f_{G45} = \frac{0,3164}{Re_{G45}^{0,25}} = 0,0181$$

Kmiec e Leschonski (1991) utilizaram  $f_p^* = 0,003$  e  $\beta = 0,4$ , então:

$$f_{P45} = \frac{u_{P45}}{u_{G45}} f_p^* + \frac{2\beta}{\frac{u_{P45}}{u_{G45}} Fr_{G45}} = 0,00203$$

### **Passo 5: Cálculo da Distribuição de Pressão no Injetor**

Serão utilizadas as Eqs. (3.11), (3.28), (3.47) e (3.53) para prever a distribuição de pressão sabendo que  $\dot{M}_{G2}/\dot{M}_{GT} = 1$ .

Entrada de Gás na Câmara de Abastecimento:

$$\text{Eq. (3.11)} \rightarrow \frac{P_{G1} - P_{G2}}{\rho_{G12}} = 1946,8K_{12} + 1886,3$$

Câmara de Abastecimento:

$$\text{Eq. (3.28)} \rightarrow \frac{P_{G2} - P_{G4}}{\rho_{G24}} = 1946,8K_{24} - 0,222$$

Tubo de mistura:

$$\text{Eq. (3.47)} \rightarrow \frac{P_{G4} - P_{G5}}{\rho_{G45}} = 225,3K_{45} - 290,3$$

Difusor:

$$\text{Eq. (3.53)} \rightarrow \frac{P_{G5} - P_{G7}}{\rho_{G57}} = 60,61K_{57} - 86,45$$

Somando as parcelas, com  $\rho_{G12} = \rho_{G24} = \rho_{G45} = \rho_{G57} = \rho_G$ , vem:

$$\frac{P_{G1} - P_{G7}}{\rho_G} = 1946,8(K_{12} + K_{24}) + 225,3K_{45} + 60,61K_{57} + 1509,3$$

Da literatura para escoamento monofásico através de bocais  $\rightarrow K_{12} = 0,05$

Deste trabalho, Figura 5.18  $\rightarrow K_{24} \approx 0,125$ ,  $K_{45} \approx 0,8$  e  $K_{57} \approx 0,25$

Substituindo:

$$P_{G1} - P_{G7} = 2535,0 \text{ Pa}$$

## Passo 6: Cálculo da Potência Consumida pelo Injetor

Para calcular a potência consumida pelo injetor, será utilizada a Eq. (3.59). Sabendo que a pressão manométrica na linha é 16 kPa, então as pressões nas secções de entrada e saída do injetor são :

$$P_{G1} = 16000 \text{ Pa e } P_{G7} = 13465 \text{ Pa.}$$

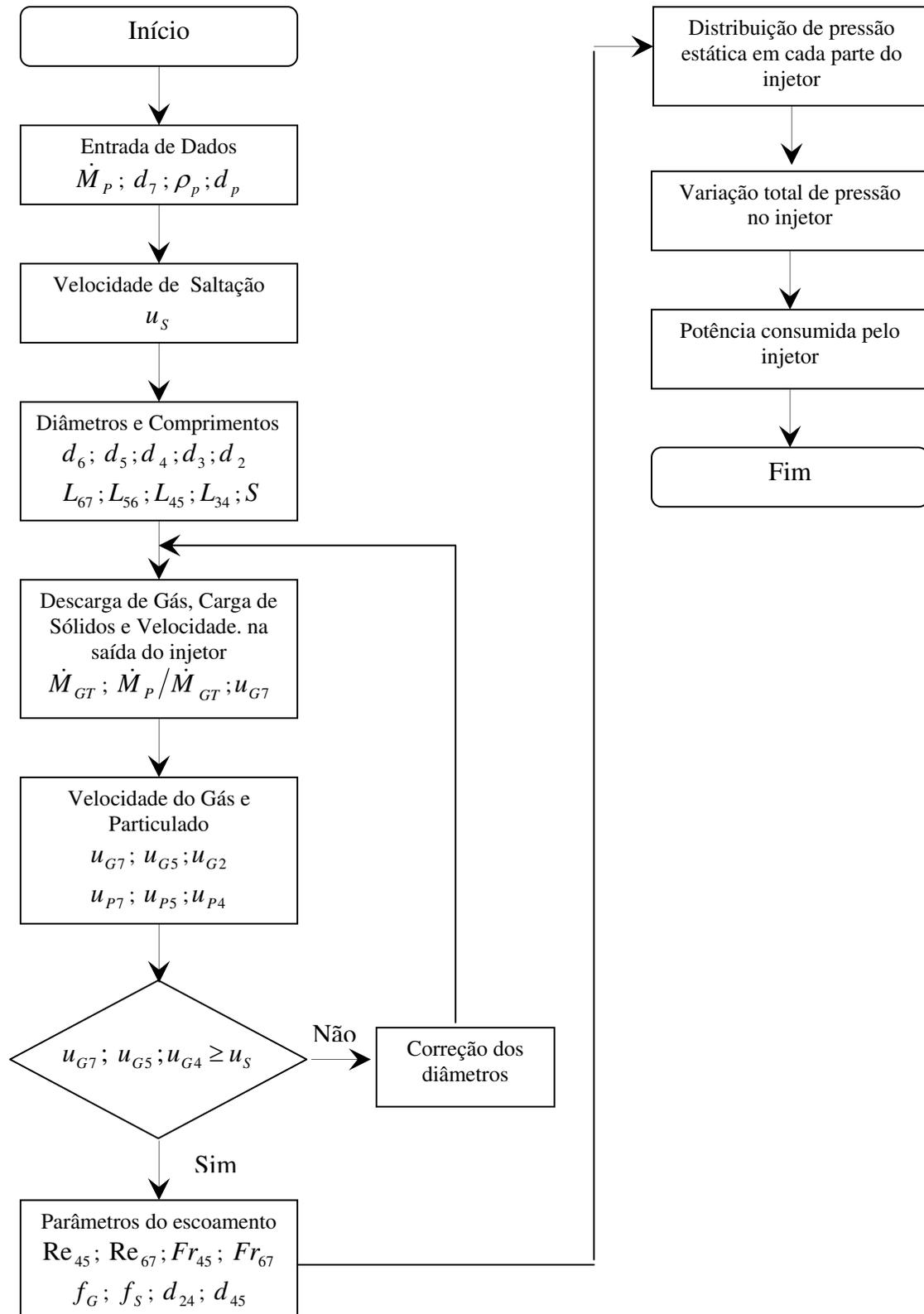
Daí:

$$\dot{W} = 0,0251 \left( \frac{16000}{1,225} + \frac{59,18^2}{2} \right) + 0,0251 \left( \frac{13465}{1,225} + \frac{10,45^2}{2} \right) - (0,0251 + 0,05) \left( \frac{13465}{1,225} + \frac{10,45^2}{2} \right)$$

$$= -180,5 \text{ W}$$

$$\dot{W} = 180,5 \cdot \frac{1}{735} = 0,25 \text{ cv}$$

## Fluxograma de Projeto de um Injetor



## Capítulo 7

### Conclusões e Recomendações

A realização deste trabalho visou contribuir para um maior conhecimento do comportamento hidrodinâmico da mistura gás-sólido em um injetor tipo Venturi, fornecendo elementos para a proposição de um procedimento para o dimensionamento deste equipamento.

Para estudar analiticamente o comportamento da pressão (estática manométrica) no injetor tomou-se como base o modelo de Bohnet (1978 e 1985), que combina a primeira lei da Termodinâmica com a segunda lei de Newton e considera o escoamento como diluído e homogêneo.

Os testes experimentais foram realizados com silo estanque, com pressão interna equalizada com o sistema, sob uma condição de operação normalmente encontrada na prática, isto é, descarga de gás entre  $0,8 \leq \dot{M}_{G2} / \dot{M}_{GT} \leq 1,2$ .

O injetor foi construído com as mesmas dimensões de um injetor estudado por Bohnet (1978), para permitir comparação dos resultados, e foi testado com três configurações diferentes para analisar a influência da geometria no escoamento gás-sólido. Foram utilizados bocais de alimentação do ar de transporte com diâmetros de  $12,64mm$ ,  $15,98mm$  e  $20,40mm$ . A carga de sólidos variou entre  $0 \leq \varphi \leq 2,2$ .

## 7.1 Distribuição de Pressão no Injetor

Para o escoamento de gás, observou-se que a distribuição de pressão estática ao longo do injetor depende da descarga de gás. À medida que se aumentou a descarga de gás, aumentou também a recuperação total de pressão no injetor.

No escoamento gás-sólido, notou-se também que a recuperação de pressão na câmara de abastecimento é função da descarga de gás. Quando a descarga de gás foi elevada, a curva de distribuição de pressão tendeu ao comportamento apresentado pelo escoamento de gás. Com o aumento da descarga de gás, a recuperação de pressão ocorreu principalmente no bocal convergente e no difusor.

Em nenhum dos testes realizados houve recuperação de pressão no tubo de mistura. Diferentemente, Bohnet (1985) ao testar a injeção de materiais com classificação B e D observou recuperação de pressão nesta região. No difusor o comportamento da distribuição de pressão de diferentes particulados sólidos foi semelhante e o efeito da diferença de propriedades dos particulados pouco alterou os valores de pressão estática na saída do injetor, mesmo que pertencentes a classes distintas.

A recuperação total de pressão no injetor variou com o quadrado da descarga de gás, tanto para o escoamento de gás como para a mistura gás-sólido, constituindo duas curvas paralelas. Isto sugere que basta levantar a curva de variação total de pressão para o ar e um teste com a mistura Ar + FCC de interesse, apenas para uma descarga de ar, para gerar a curva de variação total de pressão do escoamento gás sólido de interesse, paralela à curva do ar.

Notou-se também que, as curvas de distribuição de pressão aproximaram-se com o aumento da carga  $\varphi$ .

## 7.2 Efeito da Geometria do Injetor na Distribuição de Pressão

Ao variar os parâmetros  $S$  e  $d_2$ , conforme apresentado no Capítulo 4, verificou-se que:

Quanto menor o diâmetro de entrada de gás maior foi a recuperação total de pressão no injetor para o escoamento só de gás. Quando o catalisador de FCC foi inserido, os valores de pressão estática aumentaram em relação ao escoamento de gás, pois parte da energia cinética contida no gás foi transferida ao particulado.

O maior recuperação de pressão no injetor se deu com o diâmetro intermediário de  $d_2 = 15,98 \text{ mm}$ . Foi observado que a recuperação de pressão varia inversamente com a carga de sólidos. Este efeito se mantém, independentemente dos valores de  $d_2$  e  $S$ .

O efeito de  $S$  na distribuição de pressão afetou localmente a câmara de abastecimento e o tubo de mistura. A melhor condição observada foi a de  $S = 10,0 \text{ mm}$  para os três valores de  $d_2$ . Quanto menor for  $S$ , maior a perda de pressão na câmara de abastecimento. Esta condição causou elevados valores de pressão estática negativa na câmara de abastecimento e tubo de mistura, e isto, segundo observações visuais do experimento, proporcionou uma condição favorável ao escoamento do particulado. Esta observação foi muito próxima da observação feita por Chellapan e Ramaiyan (1986) quando afirmaram que  $S = 15,0 \text{ mm}$  maximizou a carga de sólidos na câmara de abastecimento.

### 7.3 Coeficientes de Perda de Pressão

Os valores dos coeficientes de perda de pressão no injetor  $K_{24}$  e  $K_{45}$  apresentaram o mesmo comportamento dos outros materiais para as regiões da câmara de abastecimento e tubo de mistura. Os testes mostraram que  $K_{24}$  permaneceu constante em função de Reynolds na câmara de abastecimento. Os valores obtidos de  $K_{45}$  mostraram que as perdas no tubo de mistura são superiores às da câmara de abastecimento e diminuem com o aumento da descarga de gás, isto é, com a diminuição da carga de sólidos.

Os testes mostraram que o comportamento de  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$ , para sólidos classificados como A, B e D, é semelhante. Esta informação torna o projeto de injetores mais simples.

Os valores de  $K_{45}$  e  $K_{57}$  aumentaram quando  $S$  aumentou e  $K_{24}$  permaneceu constante.

Em relação ao aumento de  $d_2$ ,  $K_{24}$  apresentou tendência decrescente,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  crescente.

## 7.4 Projeto de um Injetor

No Capítulo 6 foi apresentado um procedimento para o dimensionamento de injetores gás-sólido tipo Venturi. Devem-se considerar como dados de entrada as propriedades do sólido particulado, a descarga de sólidos necessária e o diâmetro da tubulação na qual o injetor será inserido. Como resposta obtém-se a geometria de um injetor para atender a necessidade do projeto, juntamente com a perda total de pressão que é usada para calcular a potência de injeção empregada na seleção de um soprador.

## 7.5 Recomendações

Com base nos resultados obtidos, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Estudar a injeção de materiais coesivos, pertencentes à classe C de Geldart (1973);
- Estudar a influência de parâmetros adimensionais para desenvolver uma metodologia de scale-up de injetores.

## Referências Bibliográficas

Bohnet, M. e Wagenknecht, U., Investigations on flow conditions in gas/solid-injectors, *Chemie Ingenieur Technik*, v.50 (2), pp. 135, 1978.

Bohnet, M., Design principles of gas/solids injectors, em N.P. Cheremisinoff, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, ed. Gulf, Houston TX, v.4, pp.539-561, 1985.

Bohnet, M. e Teifke, J., New Results on the Efficiency of Energy Transformation in Gas-Solids-Injectors. *Proceedings of the Symposium "Reliable Flow of Particulate Solids"*, 20-22 August, Bergen, Norway, 1985.

Chellappan, S. e Ramaiyan, G., Experimental study of design parameters of a gas-solids injector feeder, *Powder Technology*, v. 48, pp. 141-144, 1986.

Fan L.S. e Zu, C., Principles of Gas-Solid Flows. *Cambridge University Press*, UK, 1998.

Geldart, D., Types of gas fluidization, *Powder Technology*, v.7, pp. 285, 1973.

Hassan, S. e Björn, K., Pneumatic conveying of wood powder by using a steam-jet ejector, *Biomass and Bioenergy*, v.19, (2), pp 103-117, 2000.

Hubert, M. e Kalman, H., Experimental determination of length-dependent saltation velocity in dilute flows, *Powder Technology*, v.134, pp 156-166, 2003.

Kmiec, A. e Leschonski, K., Analysis of two-phase flows in gas-solids injectors, *Chem. Eng. Journal*, v.45, pp.137-147, 1991.

Lopes, M.D. Uma Contribuição ao Estudo de Escalonamento de Ciclones, Dissertação, *Unicamp*, 2002

Michon, G.J. e Bouard, R., Une etude expérimentale de la realization de mélanges air-solide dans un injecteur de type venturi, *Powder Technology*, v. 92, pp. 259-269, 1997.

Marcus, R.D., Dickson A.J., Rallis C.J., A Case of Drag Reduction and Pressure Pulsations in Pneumatic Conveying, *Powder Technology*, v. 15, pp. 107-116, 1973.

Muschelknautz, E., Theoretische und Experimentelle Untersuchungen über die Druckverluste pneumatischer Förderleitungen unter besonder Berücksichtigung des Einflusses von Gutreibung and Gutgewicht , *VDI - Forschungsheft*, (476), 1959.

Schneider, K., Use of gas-solid-ejector as inward transfer units for pneumatic conveying of bulk solids, *Bulk Solids Handling*, v.16, (3), pp 375-382, 1996.

Shames, I.H., *Mecânica dos Fluidos*, v.2, pp.84-89, 1923, Tradução, Amorelli, M.,1973

Soo, S.L., *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, *Blaisdell Publishing Company*, 1967.

Wang, D. e Wypych, P.W., Theoretical Modeling of central air-jet pump performance for pneumatic transportation of bulk solids, *Journal of Fluids Engineering*, v.121, pp 365-372, 1999.

Xiong, Y., Zhang, M. e Yuan, Z., Three-dimensional numerical simulation method for gas-solid injector, *Powder Technology*, v.160, pp 180-189, 2005.

## Apêndice A

### Rotina de Aquisição de Dados

Para realizar as tomadas de pressão estática utilizando o computador, foi necessário um sistema de aquisição de dados controlado por um software específico. O software a seguir foi preparado para ser operado em um sistema de aquisição de dados e tratamento de dados CAD 32/12 da Lynx. Trata-se de um sistema de 16 canais de 12 bits. Para implementar este sistema foi utilizado um computador com processador de 133 Mhz e 64 MB RAM.

Neste sistema a frequência de aquisição pode ser variável por canal tornando-o flexível. O número de amostras também pode ser variável. O software foi desenvolvido em Turbo C 3.0. Para este trabalho foram utilizados três canais, um para o transdutor TD1, o termopar TE1 e a balança eletrônica TOLEDO.

Tanto o transdutor de pressão SMAR LD 301 quanto a balança TOLEDO trabalham com sinal de saída em corrente elétrica de 4 a 20 mA. O termopar IOPE trabalha entre uma faixa de tensão de  $-5 \leq V \leq 5$ . A placa CAD32/12 de aquisição e tratamento de dados faz a leitura de sinais em tensão, portanto se fez necessário converter as saídas de corrente elétrica em tensão elétrica e para isso utilizou-se um resistor de precisão de 255 Ohms.

Após esta conversão foi necessário calibrar os equipamentos. O resultado das calibrações pode ser vistos figuras A.1 e A.2 e a seguir segue o código computacional.

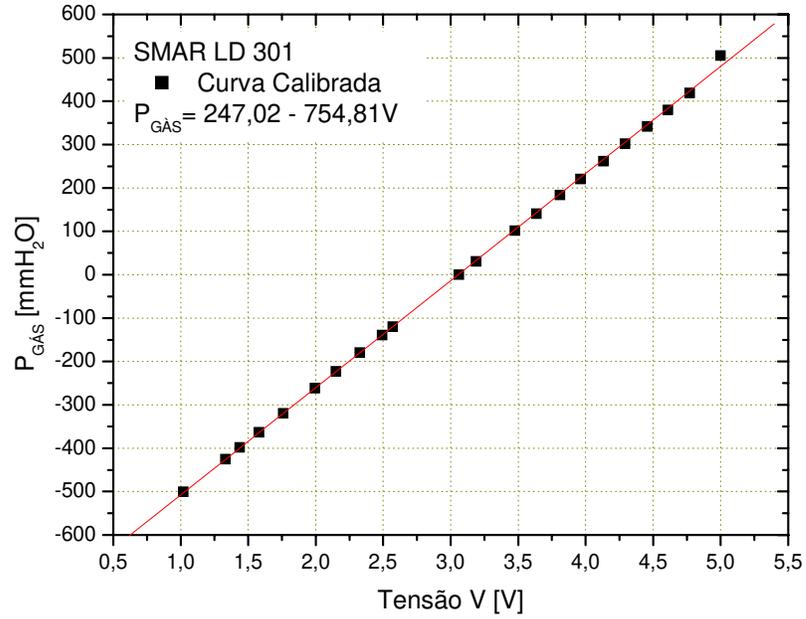


Figura A.1 – Curva de Calibração do Transdutor de Pressão

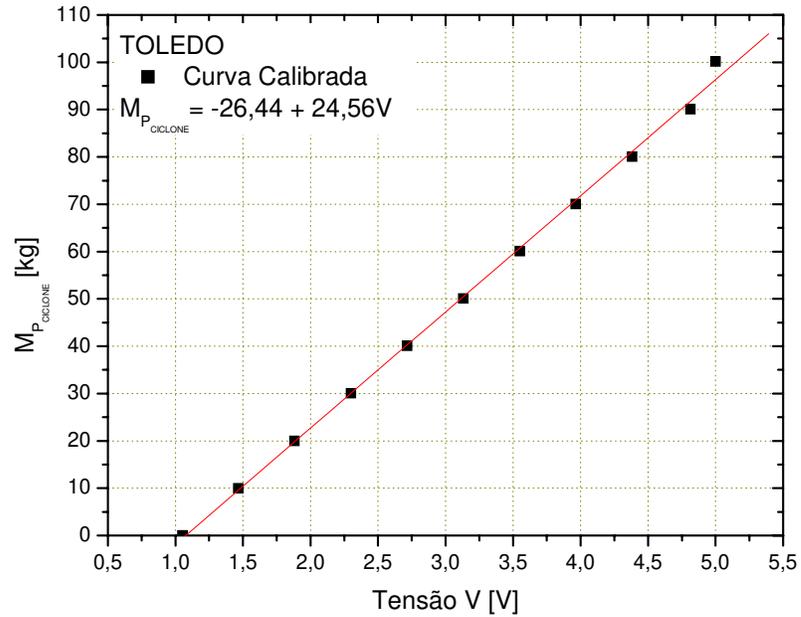


Figura A.2 – Curva de Calibração da Balança Toledo

```

#include <io.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
float Conv (int);

/*=====*/
/*  PROGRAMA DE AQUISICAO E TRATAMENTO DE DADOS DA PLACA CAD12/32
/*  Medida de pressao com transdutor SMAR LD301
/*  Medida de descarga de solidos com balanca TOLEDO 2090 e indicador
/*  digital 9091
/*  Este programa foi elaborado em linguagem Turbo C 3.0 (Borland)  /*
e aplicado 'a placa de aquisicao de dados da Lynx Eletronica Ltda
/*  na CONFIGURACAO PADRAO (vide Manual do Usuario e Referencia)
/*  Autor: Eng. Rogerio B Domingues e-mail: rogeriod@fem.unicamp.br
/*  julho de 2004
/*  Campinas - SP - Brasil - Fone (019) 3788-3370
/*=====*/

/*=====*/
/*          Declaracoes Relacionadas `a CAD12/32          */
/*=====*/
/*-----*/
/*  A placa ocupa 8 enderecos de entrada/saida a          */
/*  partir do endereco base definido pelo conjunto        */
/*  JUMPER's J8.                                          */
/*-----*/

unsigned int EndBase;          /* Endereco base da placa          */
unsigned int CadCtr0;         /* Reg. Contador 0 da CAD12/32    */
unsigned int CadCtr1;         /* Reg. Contador 1 da CAD12/32    */
unsigned int CadCtr2;         /* Reg. Contador 2 da CAD12/32    */
unsigned int CadModo;         /* Reg. de Modo do Timer          */
unsigned int CadStatus;      /* Reg. Estado da CAD12/32        */
unsigned int ByteA;          /* Reg. Byte A do conversor A/D   */
unsigned int ByteB;          /* Reg. Byte B do conversor A/D   */
unsigned int Converte;
unsigned int Ganho;
unsigned int CadESD0;         /* Reg. E/S digital 0            */
unsigned int CadESD1;         /* Reg. E/S digital 1            */
unsigned int Faixa;          /* Faixa de aquisicao dos sinais   */
                          /* analogicos                      */

/*-----*/
/*          Codificacao do ganho das entradas A/D          */
/*-----*/
/*  byte para selecionar ganho                            */
/*  7   6   5   4   3   2   1   0                            */
/*  bip/  G   G   G   x   x   x   Cal                            */
/*  unip 10   5   2                                           */

/*  unipolar = 0 / bipolar = 1                            */
/*  unipolar = 0 a Y volts                                  */
/*  bipolar  = -Y a Y volts                                  */

```

```

/* para ativar ganho colocar bit em 0 */
/* assim temos: */

#define cBi5v0      0xf0      /* -5.0 a 5.0 V */
#define cUni5v0     0x70      /* 0.0 a 5.0 V */
#define cBi2v5      0xe0      /* -2.5 a 2.5 V */
#define cUni2v5     0x60      /* 0.0 a 2.5 V */
#define cBilv0      0xd0      /* -1.0 a 1.0 V */
#define cUnilv0     0x50      /* 0.0 a 1.0 V */
#define cBi0v5      0xb0      /* -0.5 a 0.5 V */
#define cUni0v5     0x30      /* 0.0 a 0.5 V */

/*-----*/
/* Declaracoes referentes a aquisicao de dados */
/*-----*/
unsigned int canaldadosT1[50]; /* Numero maximo de amostras - junta fria
*/
unsigned int canaldadosT2[50]; /* Numero maximo de amostras - termopar
*/
unsigned int canaldadosP1[30000]; /* Numero maximo de amostras - transdutor
*/
unsigned int canaldadosM1[50]; /* Numero maximo de amostras - balanca
*/
int numeroamostrasP; /* Numero de amostras p/ P */
int numeroamostrasT; /* Numero de amostras p/ T */
int numeroamostrasM; /* Numero de amostras p/ M */
int frequaquis; /* Freq. de aquisicao dos dados analogicos */

/*-----*/
/* Declaracoes referentes a descarga de solidos */
/*-----*/
float M; /* Massa de solidos [kg] */
float descarga; /* Descarga de solidos com a balanca */
float horas; /* Tempo total de aquisicao de dados - horas */
float minutos; /* Tempo total de aquisicao de dados - minutos*/
float segundos; /*Tempo total de aquisicao de dados - segundos*/
float decimos;
float dt;
float inicio, fim;

/*-----*/
/* Declaracoes referentes a pressao diferencial */
/*-----*/
float Vpres,Vball1,Vbal2; /* Pressao da mistura [Pascal]
*/
float T; /* Temperatura da mistura [Celcius]
float Pdif; /* Variavel que contem os valores das pressoes
*/

/*-----*/
/* Declaracoes referentes a interrupcao */
/*-----*/
#define IntAck      0x20 /* Reg. de reconhecimento de interrupcao */
#define IntMask     0x21 /* Reg. da mascara de interrupcoes */
unsigned int IntUsada; /* Interrupcao usada pela placa */
int VetLeit [8]; /* Dados lidos na interrupcao */
int novaleitura; /* Controle do intervalo entre leituras */

```

```

/*=====*/
/*          Rotina  IniciaEnderecoHardware          */
/*=====*/
void IniciaEnderecoHardware ()
{
    CadCtr0   = EndBase;
    CadCtrl1  = EndBase + 1;
    CadCtr2   = EndBase + 2;
    CadModo   = EndBase + 3;
    CadStatus = EndBase + 3;
    ByteA     = EndBase + 4;
    ByteB     = EndBase + 5;
    Converte  = EndBase + 4;
    Ganho     = EndBase + 5;
    CadESD0   = EndBase + 6;
    CadESD1   = EndBase + 7;
}
/*=====*/
/*          Rotina  AutoCalibracao          */
/*          A auto-calibracao elimina os erros de nao- */
/*          linearidade durante o processo de conversao. */
/*=====*/
void AutoCalibracao ()
{
    char B;
    int i, j;
    outportb (Ganho, 0);
    outportb (Ganho, 1);
    outportb (Ganho, 0);
    sleep (1); /* Aguarda pelo menos 800 ms */
    outportb (Converte, 0);
    do { B = inportb (CadStatus); }
    while ((B & 0x10) != 0); /* espera final de conversao */
    i = inportb (ByteB);
    i = inportb (ByteA);
    i++;}

```

## Apêndice B

### Rotina de Determinação da Descarga de Gás

Utilizando a norma ISO 5167 de 1998 determina-se a descarga de ar, através de uma placa de orifício, tipo “*corner taps*”, utilizando a seguinte seqüência de cálculo:

$$\beta = \frac{d_{PO1}}{D}$$

onde  $d_{PO1}$  é o diâmetro do orifício [m] e  $D$  é o diâmetro do externo da placa [m].

$$e = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \frac{\Delta p_{PO1}}{k \cdot p_{PO1}}$$

onde  $e$  é a expansibilidade do gás [adimensional] e  $k$  é a rugosidade equivalente do material do tubo [m].

$$\rho_{PO1} = \frac{P_{PO1}}{R \cdot T_{PO1}}$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases igual a 8312 [Nm/kgK].

$$u_D = \frac{\dot{M}_{GL}}{A_D \rho_{PO1}}$$

onde  $u_D$  é a velocidade na linha de ar comprimido [m/s];  $A_D$  é a área da secção transversal do diâmetro externo da placa [m<sup>2</sup>] e  $\dot{M}_{GL}$  é a descarga de ar na linha [kg/s].

$$\text{Re}_D = \frac{\rho_{PO1} u_D D}{\mu_{PO1}}$$

onde  $\text{Re}_D$  é o número de Reynolds do escoamento de ar no tubo [adimensional] e  $\mu_{PO1}$  é a viscosidade dinâmica do ar [Ns/m<sup>2</sup>].

$$\begin{aligned} C = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6 \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,7} \\ & + \left( 0,0188 + 0,0063 \left( \frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,8} \right) \left( \frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,3} \beta^{3,5} \\ & + \left( 0,043 + 0,08e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1} \right) \left( 1 - 0,11 \left( \frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,8} \right) \left( \frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,3} \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\ & - 0,031 \left( \frac{2L_2}{1 - \beta} - 0,8 \left( \frac{2L_2}{1 - \beta} \right)^{1,1} \right) \beta^{1,3} \end{aligned}$$

onde  $C$  é o coeficiente de descarga [ adimensional].

E se  $D \leq 0,07112m$  deve-se somar a Eq.(4.5) o termo:

$$+ 0,011(0,75 - \beta) \left( 2,8 - \frac{D}{0,0254} \right)$$

Aplicando a Eq.(4.7) para o experimento, sabendo que a placa de orifício utilizada possui tomadas de pressão nos cantos, segundo a norma ISO 5167 de 1998,  $L_1 = L_2 = 0$ . Como  $D = 0,145m$ , então não é necessário somar a Eq.(4.8) na Eq.(4.7). Portanto,

$$\begin{aligned}
C = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521\left(\frac{10^6\beta}{\text{Re}_D}\right)^{0,7} \\
& + \left(0,0188 + 0,0063\left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D}\right)^{0,8}\right)\left(\frac{10^6}{\text{Re}_D}\right)^{0,3}\beta^{3,5} \\
& - 0,072\left(1 - 0,11\left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D}\right)^{0,8}\right)\left(\frac{10^6}{\text{Re}_D}\right)^{0,3}\frac{\beta^4}{1 - \beta^4}
\end{aligned}$$

Finalmente,

$$\dot{M}_{GL} = \frac{eCA_d\sqrt{2\rho_{PO1}\Delta p_{PO1}}}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

onde  $A_d$  é a área da secção transversal do orifício [m<sup>2</sup>].

Nota-se que se trata se um processo iterativo entre o  $\text{Re}_D$  e  $\dot{M}_{GL}$ . Por isso foi utilizado um programa computacional apresentado no Apêndice A para calcular a descarga total de ar. Determinada a descarga de ar na linha, ajustar VR2 até promover a descarga de ar utilizada no teste. Manter a válvula VR2 fixa e abrir válvula VFD1 totalmente. Fechar a válvula VR3.

```

{*****}
{
    Universidade Estadual de Campinas
{
    Faculdade de Engenharia Mecânica
{
    Dept$ de Engenharia Térmica e de Fluidos
{*****}
{
    Programa para o cálculo da descarga de ar
{
    através de uma placa de orifício
{
    Código específico para placas com tomadas
{
    de pressão tipo "corner taps"
{
    Autor: Eng. Rogerio B Domingues e-mail: rogeriod@fem.unicamp.br
{
    Julho de 2004
{
    Campinas - SP - Brasil - Fone (019) 3788-3370
{*****}

```

```

program Placa_Orificio;

```

```

Uses Crt;

```

```

Var M,Mteor,Dext,rho,p1,K,mi,dif: real;
    beta,e,ReDext,A,B,C,D,Cd,Dint:real;
    uDM, uDRe,temp,deltap,R,deltau: real;
    i: integer;
    F: Text;

```

```

Procedure Entrada_de_dados;

```

```

begin
writeln(' ***** Entrada de Dados ***** ');
writeln;
repeat
writeln('Diametro da tubulacao (0,05<=D<=1) [m]:');
read(Dext); {difmetro externo da tubulacao m}
if (0.05 > Dext) or (Dext > 1) then begin
writeln('Out of range !!!');
writeln('Digite novamente o diametro da tubulacao:');
read(Dext);
end;
until (0.05<=Dext) or (Dext<=1);
writeln('Diametro do orificio [m]:');
read(dint); {diametro interno placa orificio [m]}
writeln('Temperatura do ar [°C]:');
read(temp); {temperatura °C}
writeln('Queda de pressao na placa [mmH2O]:');
read(deltap);{deltap mmH2O}
writeln('Pressao est tica a montante da placa [mmH2O]:');
read(p1);{pressao estatica a montante mmH2O}
K:=1.4; {coeficiente isoentrópico do g s }
mi:=0.000018; {viscosidade do g s Ns/mý}
end;

```

```

Procedure Calculo_beta;

```

```

begin
beta:=dint/dext;
end;

```

```

Procedure Calculo_e;

```

```

begin
deltap:=deltap*9.81;

```

```

p1:=p1*9.81;
e:=1-(0.41+0.35*exp(4*ln(beta)))*(deltap/(K*p1)); {expansibilidade do g s}
end;

Procedure Calculo_rho;
begin
temp:=temp+273;
rho:=p1/(273*temp);
end;

Procedure Calculo_Cd;
begin
A:=0.5961+0.0261*sqr(beta);
B:=0.216*exp(8*ln(beta))+0.000521*exp(0.7*ln((1000000*beta)/ReDext));
C:=(0.0188+(0.0063*exp(0.8*ln((19000*beta)/ReDext))))*exp(0.3*ln(1000000/ReDext))*exp(3.5*ln(beta));
D:=0.072*(1-(0.11*exp(0.8*ln((19000*beta)/ReDext))*exp(0.3*ln(1000000/ReDext))*(exp(4*ln(beta))/(1-exp(4*ln(beta))))));
Cd:=A-B+C-D;
end;

procedure Calculo_M;
begin
M:=e*Cd*(pi*sqr(dint)/4)*sqrt(2*rho*deltap)/sqrt(1-(beta*beta*beta*beta));
end;

{Programa Principal}

Begin
clrscr;
Assign(F,'C:\Ori.txt'); { Standard output }
Rewrite(F);
writeln;
writeln('Determina#ao de uma Placa de Orificio segundo Norma ISO (1998) ou ASME (1971)');
writeln;
writeln;
Entrada_de_dados;
writeln;
Mteor:=0.0000001; {valor inicial para a descarga}
Calculo_beta;
Calculo_e;
Calculo_rho;
i:=0;
writeln(F,'Iteracoes ...');
writeln(F,'');
for i:=1 to 10 do begin
uDM:=Mteor/((pi*sqr(Dext)/4)*rho);
ReDext:=rho*uDM*Dext/mi;
Calculo_Cd;
Calculo_M;
writeln(F,'Mteor:',Mteor:2:10);
writeln(F,'M:', M:2:10);
writeln(F,'');
dif:=Mteor-M;

```

```
if abs(dif)>=0.0000001 then
begin
Mteor:=M;
end;
i:=i+1;
end;
writeln(F,'');
writeln(F,' ***** Resultados Finais ***** ');
writeln(F,'');
writeln(F,'Descarga [kg/s] :',M:2:6);
writeln(F,'Numero de Reynolds no tubo:',ReDext:2:2);
writeln(F,'Coef de Descarga: ',Cd:2:4);
writeln(F,'Velocidade no tubo [m/s]:',uDM:2:4);
readln;
close(F);
end.
```

## Apêndice C

### Dados Experimentais

Neste apêndice serão apresentados os dados reduzidos a partir dos dados de pressão estática adquiridos nos testes conforme o procedimento descrito no Capítulo 4. Para determinar a velocidade do particulado foi utilizado a rotina apresentada no Apêndice D. Todas as unidades estão no SI, exceto a temperatura do gás que foi apresentada em °C e o diâmetro do bocal em mm.

Tabela D.1 Valores obtidos para  $K_{24}$ ,  $K_{45}$  e  $K_{57}$  em função dos parâmetros geométricos  $S$  e  $d_2$

<b>Câmara de Abastecimento - K24</b>			
<b>S [mm]</b>	<b>d2 [mm]</b>		
	<b>12,640</b>	<b>15,980</b>	<b>20,400</b>
<b>10,0</b>	0,6741	0,3891	0,2881
<b>30,0</b>	0,6695	0,3440	0,2395
<b>50,0</b>	0,6473	0,4236	0,2518
<b>Tubo de Mistura - K45</b>			
<b>S [mm]</b>	<b>d2 [mm]</b>		
	<b>12,640</b>	<b>15,980</b>	<b>20,400</b>
<b>10,0</b>	-0,8270	-0,7264	0,5059
<b>30,0</b>	0,3076	0,2460	0,7561
<b>50,0</b>	0,4713	0,7281	1,0065
<b>Difusor - K57</b>			
<b>S [mm]</b>	<b>d2 [mm]</b>		
	<b>12,640</b>	<b>15,980</b>	<b>20,400</b>
<b>10,0</b>	0,3160	0,3618	0,4779
<b>30,0</b>	0,2684	0,3928	0,5148
<b>50,0</b>	0,3160	0,4327	0,6020

Tabela D.2 Dados reduzidos dos testes para comparação com os dados de Bohnet (1985), Michon e Bouard (1997) e Chellappan e Ramaiyam (1986).

L [m]	Temperatura Média do Gás = 28,70°							
	$d_2 = 20,40mm$							
	$S = 50,0mm$							
	$\dot{M}_p = 0,079 kg/s$							
	$\dot{M}_{G_2} [kg/s]$							
	0,03539		0,04078		0,04919		0,05900	
	Distribuição de Pressão [kPa]							
	Ar	FCC	Ar	FCC	Ar	FCC	Ar	FCC
0,000	-5,326	-1,291	-8,191	-1,597	-11,273	-3,365	-13,934	-7,237
0,010	-0,534	0,732	-1,461	0,672	-0,601	-0,869	-0,419	-1,630
0,030	-0,521	1,756	-1,492	1,807	-0,572	-0,131	-0,321	-1,423
0,050	-0,506	1,373	-1,491	1,555	-0,578	0,905	-0,256	-1,396
0,068	0,430	1,135	-0,479	3,182	1,288	4,269	2,293	4,984
0,083	1,072	2,829	0,759	1,620	2,615	5,425	4,162	5,251
0,105	1,107	2,185	0,887	2,367	2,531	3,486	4,305	4,238
0,128	1,322	1,671	1,207	1,979	3,007	2,765	5,017	3,631
0,151	1,368	1,303	1,354	1,618	3,170	2,368	5,288	3,047
0,175	1,353	0,912	1,282	1,193	2,976	1,818	5,188	2,357
0,220	2,050	1,212	2,298	1,563	4,567	2,306	7,163	3,224
0,280	2,310	1,476	2,668	1,854	5,032	2,698	7,898	3,953
0,325	2,451	1,732	2,866	2,132	5,319	3,016	8,298	4,605
$\varphi$	0,000	2,108	0,000	1,820	0,000	1,473	0,000	1,240
$\rho_{G2}$	1,085	1,099	1,079	1,103	1,079	1,090	1,102	1,090
$\rho_{G4}$	1,103	1,123	1,104	1,114	1,104	1,163	1,155	1,168
$\rho_{G5}$	1,106	1,101	1,110	1,109	1,110	1,121	1,167	1,134
$\rho_{G7}$	1,119	1,111	1,129	1,120	1,129	1,135	1,203	1,160
$\rho_{G24}$	1,094	1,111	1,092	1,109	1,092	1,126	1,128	1,129
$\rho_{G45}$	1,100	1,106	1,101	1,109	1,101	1,124	1,147	1,131
$u_{G2}$	103,858	102,485	120,310	117,631	120,310	143,688	170,486	172,312
$u_{G5}$	49,717	49,946	56,394	56,447	56,394	66,495	75,767	77,967
$u_{G7}$	17,697	17,828	19,974	20,124	19,974	23,646	26,456	27,436
$u_{G24}$	76,788	76,216	88,352	87,039	88,352	105,092	123,126	125,140
$u_{G45}$	63,253	63,081	72,373	71,743	72,373	85,794	99,447	101,553
Re 2	1,05E+05	1,05E+05	1,20E+05	1,21E+05	1,20E+05	1,45E+05	1,72E+05	1,73E+05
Re 5	8,80E+04	8,80E+04	1,01E+05	1,01E+05	1,01E+05	1,20E+05	1,43E+05	1,43E+05
Mach 2	0,297	0,293	0,345	0,337	0,412	0,413	0,491	0,497
$\rho_{G1}$	374,054	5623,230	7600,003	7437,175	10919,771	10958,741	15585,109	15758,857
$\rho_{G2} - \rho_{G4}$	-28,597	-640,392	29,125	-883,480	-23,288	-883,480	-163,252	-233,502
$\rho_{G4} - \rho_{G5}$	-246,831	1273,922	-394,693	1174,022	-444,793	1174,022	-882,748	1881,351
$\rho_{G5} - \rho_{G7}$	-400,153	-520,225	-567,917	-569,537	-751,374	-569,537	-1135,440	-1380,321
$u_{P4}$		5,660		6,510		6,510		9,580
$u_{P5}$		8,590		9,880		9,880		14,320
$u_{P7}$		11,000		12,640		12,640		18,250
$f_{G45}$		0,0185		0,0180		0,0180		0,0168
$f_{P45}$		0,0009		0,0008		0,0008		0,0006
K <sub>24</sub>	0,350	0,064	0,379	0,101	0,396	0,118	0,410	0,299
K <sub>45</sub>	0,438	1,062	0,423	0,860	0,496	0,968	0,459	0,910
K <sub>57</sub>	0,581	0,462	0,553	0,523	0,570	0,564	0,539	0,457

Tabela D.3 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor -  $d_2 = 12,64mm$

L [m]	Diametro Médio do Escoamento[m]	Temperatura Média do Gás [°C]					
		31,62		30,94		25,22	
		$d_2 = 12,64mm$ $\dot{M}_{G2} = 0,0356 kg/s$					
		$S = 10,0mm$		$S = 30,0mm$		$S = 50,0mm$	
		$\dot{M}_{GT} [kg/s]$	$\dot{M}_P [kg/s]$	$\dot{M}_{GT} [kg/s]$	$\dot{M}_P [kg/s]$	$\dot{M}_{GT} [kg/s]$	$\dot{M}_P [kg/s]$
		0,0391	0,0735	0,0391	0,0730	0,0391	0,0728
		Distribuição de Pressão [kPa]					
		Ar	FCC	Ar	FCC	Ar	FCC
0,0000	0,0126	-34,409	-26,029	-31,800	-27,916	-31,794	-24,089
0,0100	0,0165	-11,457	-3,853	-9,668	-2,949	-9,224	-2,991
0,0300	0,0165	-11,812	-4,183	-9,957	-3,619	-9,213	-3,387
0,0500	0,0165	-11,811	-4,247	-9,931	-3,766	-9,162	-3,361
0,0675	0,0165	-11,937	-4,605	-9,555	-3,438	-8,203	-2,769
0,0825	0,0165	-11,974	-3,918	-6,230	-2,316	-4,777	-2,393
0,1050	0,0204	-11,326	-3,736	-5,716	-2,179	-4,403	-2,221
0,1280	0,0204	-10,178	-3,442	-0,181	-1,763	0,037	-1,568
0,1510	0,0204	-0,160	-0,495	0,496	-0,156	0,540	-0,265
0,1750	0,0204	0,506	-0,350	0,599	-0,267	0,606	-0,352
0,2200	0,0500	1,369	0,227	1,341	0,258	1,336	0,129
0,2800	0,0500	1,669	0,711	1,634	0,668	1,626	0,481
0,3250	0,0500	1,838	1,079	1,789	1,029	1,760	0,827
	$\phi$	0,000	2,065	0,000	2,051	0,000	2,044
	$\rho_{G2}$	0,957	1,043	0,979	1,056	1,003	1,076
	$\rho_{G4}$	0,951	1,043	1,019	1,063	1,055	1,083
	$\rho_{G5}$	1,093	1,084	1,097	1,087	1,118	1,107
	$\rho_{G7}$	1,109	1,100	1,110	1,102	1,131	1,121
	$\rho_{G24}$	0,954	1,043	0,999	1,060	1,029	1,079
	$\rho_{G45}$	1,023	1,063	1,048	1,073	1,074	1,093
	$U_{G2}$	296,591	271,882	289,734	268,615	282,814	263,681
	$U_{G5}$	46,065	51,050	45,918	50,892	45,050	49,980
	$U_{G7}$	16,356	18,105	16,327	18,074	16,025	17,772
	$U_{G24}$	171,328	161,466	167,826	159,754	163,932	156,831
	$U_{G45}$	108,696	106,258	106,872	105,323	104,491	103,405
	Re 2	1,61E+05	1,57E+05	1,59E+05	1,57E+05	1,59E+05	1,57E+05
	Re 5	5,71E+04	6,28E+04	5,71E+04	6,28E+04	5,71E+04	6,28E+04
	Mach 2	0,848	0,821	0,829	0,811	0,817	0,796
	$p_{G1}$	-55,045	-40,509	-49,904	-43,015	-49,287	-36,572
	$p_{G2} - p_{G4}$	354,117	393,447	262,499	816,866	-61,351	369,941
	$p_{G4} - p_{G5}$	-11831,905	-3386,101	-6314,876	-1911,558	-5009,175	-1868,563
	$p_{G5} - p_{G7}$	-468,467	-851,812	-447,786	-771,066	-424,615	-697,968
	$U_{P4}$		10,230		11,890		12,980
	$U_{P5}$		18,840		19,680		19,600
	$U_{P7}$		25,180		25,750		25,050
	$f_{G45}$		0,016		0,016		0,016
	$f_{P45}$		0,000		0,000		0,000
	K24	0,767	0,674	0,760	0,669	0,752	0,647
	K45	-4,568	-0,827	-0,759	0,308	0,078	0,471
	K57	0,538	0,211	0,552	0,268	0,562	0,316

Tabela D.4 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor -  $d_2 = 15,98mm$

L [m]	Diametro Médio do Escoamento[m]	Temperatura Média do Gás [°C]					
		29,500		30,190		32,600	
		$d_2 = 15,98mm$					
		$\dot{M}_{G2} = 0,0356 \text{ kg/s}$					
		$S = 10,0mm$		$S = 30,0mm$		$S = 50,0mm$	
$\dot{M}_{GT} [kg/s]$ $\dot{M}_P [kg/s]$		$\dot{M}_{GT} [kg/s]$ $\dot{M}_P [kg/s]$		$\dot{M}_{GT} [kg/s]$ $\dot{M}_P [kg/s]$			
0,0391    0,0744		0,0391    0,0747		0,0391    0,0728			
Distribuição de Pressão [kPa]							
		Ar	FCC	Ar	FCC	Ar	FCC
0,000	0,0160	-16,212	-10,287	-13,703	-9,703	-12,195	-9,555
0,010	0,0199	-6,852	-8,150	-5,920	-5,055	-5,308	-8,449
0,030	0,0199	-6,846	-7,105	-5,936	-3,203	-5,215	-7,367
0,050	0,0199	-6,841	-4,670	-5,916	-1,447	-5,286	-5,955
0,068	0,0199	-6,891	-3,626	-6,081	-1,249	-4,681	-4,563
0,083	0,0199	-6,982	-2,019	-4,285	-0,556	-2,449	0,001
0,105	0,0235	-3,878	-1,762	-1,737	-0,493	-0,676	-0,132
0,128	0,0235	-3,511	-1,507	0,233	0,230	0,545	-0,245
0,151	0,0235	0,517	0,042	0,824	0,327	0,856	0,276
0,175	0,0235	0,856	0,134	0,916	0,119	0,856	0,050
0,220	0,0500	1,671	0,547	1,658	0,485	1,582	0,406
0,280	0,0500	1,951	0,865	1,930	0,801	1,849	0,720
0,325	0,0500	2,109	1,198	2,075	1,100	1,987	0,974
$\varphi$		0,000	2,089	0,000	2,098	0,000	2,045
$\rho_{G2}$		1,016	1,001	1,025	1,035	1,024	0,988
$\rho_{G4}$		1,015	1,072	1,043	1,086	1,056	1,084
$\rho_{G5}$		1,105	1,097	1,103	1,094	1,094	1,085
$\rho_{G7}$		1,119	1,109	1,116	1,105	1,107	1,095
$\rho_{G24}$		1,016	1,037	1,034	1,060	1,040	1,036
$\rho_{G45}$		1,060	1,067	1,069	1,077	1,067	1,060
$u_{G2}$		191,601	194,461	173,232	188,207	173,417	197,130
$u_{G5}$		49,998	50,377	50,081	50,500	50,510	50,938
$u_{G7}$		17,767	17,935	17,814	17,995	17,972	18,161
$u_{G24}$		120,800	122,419	111,656	119,353	111,964	124,034
$u_{G45}$		85,399	86,398	80,869	84,927	81,237	87,486
Re 2		136661,452	136975,097	126708,060	135493,033	126431,343	137086,322
Re 5		69399,583	69399,583	69399,583	69399,583	69399,583	69399,583
Mach 2		0,549	0,558	0,496	0,539	0,495	0,562
$p_{G1}$		-19,905	-12,705	-16,214	-11,824	-14,416	-11,843
$p_{G2} - p_{G4}$		-10,203	-3480,286	-4,542	-3607,857	-22,229	-2493,300
$p_{G4} - p_{G5}$		-4734,212	-1896,194	-2652,796	-612,120	-1531,031	-181,818
$p_{G5} - p_{G7}$		-438,137	-650,838	-417,371	-614,618	-404,730	-568,423
$u_{P4}$			7,040		8,150		9,470
$u_{P5}$			13,350		13,410		14,160
$u_{P7}$			17,920		17,530		18,050
$f_{G45}$			0,017		0,017		0,017
$f_{P45}$			0,000		0,001		0,001
K24		0,695	0,389	0,693	0,344	0,690	0,424
K45		-1,796	-0,726	-0,314	0,246	0,486	0,728
K57		0,556	0,362	0,572	0,393	0,583	0,433

Tabela D.5 Dados reduzidos dos testes para avaliar a influencia da geometria do bocal de entrada de ar na distribuição de pressão no injetor -  $d_2 = 20,40mm$ .

L [m]	Diâmetro Médio do Escoamento[m]	Temperatura Média do Gás [°C]					
		29,500		30,190		32,600	
		$d_2 = 20,40mm$					
		$\dot{M}_{G2} = 0,0356 \text{ kg/s}$					
		S = 10,0mm		S = 30,0mm		S = 50,0mm	
		$\dot{M}_{GT}[\text{kg/s}]$	$\dot{M}_P[\text{kg/s}]$	$\dot{M}_{GT}[\text{kg/s}]$	$\dot{M}_P[\text{kg/s}]$	$\dot{M}_{GT}[\text{kg/s}]$	$\dot{M}_P[\text{kg/s}]$
		0,03905	0,05512	0,03905	0,07059	0,03905	0,07658
		Distribuição de Pressão [kPa]					
		Ar	FCC	Ar	FCC	Ar	FCC
0,000	0,0204	-5,544	-2,701	-5,034	-2,014	-6,217	-2,225
0,010	0,0239	-1,675	-2,338	-4,670	-1,854	-1,143	-2,248
0,030	0,0239	-1,673	-1,929	-4,166	-1,588	-1,115	-1,875
0,050	0,0239	-1,674	-1,358	-1,281	-0,928	-1,067	-1,588
0,068	0,0239	-1,706	-1,090	-1,120	-0,688	-0,293	2,270
0,083	0,0239	-1,065	0,794	0,062	0,461	0,552	2,537
0,105	0,0264	0,109	0,719	0,436	1,305	0,634	1,624
0,128	0,0264	0,729	0,578	0,753	1,016	0,879	1,032
0,151	0,0264	0,973	0,450	0,896	0,730	0,968	0,788
0,175	0,0264	1,008	0,181	0,863	0,367	0,918	0,353
0,220	0,0500	1,788	0,527	1,606	0,621	1,701	0,672
0,280	0,0500	2,072	0,803	1,854	0,850	1,977	0,856
0,325	0,0500	2,233	1,045	1,996	1,081	2,117	1,008
	$\varphi$	0,000	1,411	0,000	1,808	0,000	1,961
	$\rho_{G2}$	1,076	1,068	1,041	1,074	1,082	1,069
	$\rho_{G4}$	1,083	1,104	1,096	1,100	1,102	1,124
	$\rho_{G5}$	1,107	1,097	1,105	1,099	1,106	1,099
	$\rho_{G7}$	1,121	1,107	1,118	1,108	1,120	1,107
	$\rho_{G24}$	1,079	1,086	1,069	1,087	1,092	1,097
	$\rho_{G45}$	1,093	1,092	1,087	1,093	1,099	1,098
	$U_{G2}$	101,110	101,833	104,459	101,305	100,539	101,735
	$U_{G5}$	49,919	50,352	49,995	50,254	49,966	50,262
	$U_{G7}$	17,745	17,964	17,788	17,957	17,766	17,971
	$U_{G24}$	75,515	76,093	77,227	75,779	75,252	75,998
	$U_{G45}$	62,717	63,223	63,611	63,017	62,609	63,130
	Re 2	104576,883	104548,851	105175,937	104489,414	104456,092	104564,258
	Re 5	77602,629	77602,629	77602,629	77602,629	77602,629	77602,629
	Mach 2	0,290	0,307	0,299	0,306	0,287	0,307
	$p_{G1}$	-5,877	-2,884	-5,357	-2,149	-6,582	-2,375
	$p_{G2} - p_{G4}$	-0,412	-979,631	-3389,237	-926,361	-76,846	-659,870
	$p_{G4} - p_{G5}$	-899,414	538,351	-427,018	938,209	-283,713	1271,402
	$p_{G5} - p_{G7}$	-444,354	-518,268	-389,684	-459,200	-415,963	-336,453
	$U_{P4}$		5,150		6,070		6,960
	$U_{P5}$		9,790		10,040		10,530
	$U_{P7}$		13,140		13,140		13,470
	$f_{G45}$		0,017		0,017		0,017
	$f_{P45}$		0,001		0,001		0,001
	$K_{24}$	0,567	0,288	0,011	0,240	0,550	0,252
	$K_{45}$	-0,071	0,506	0,311	0,756	0,366	1,007
	$K_{57}$	0,553	0,478	0,593	0,515	0,574	0,602

## Apêndice D

### Rotina de Determinação da Velocidade do Particulado

Como já descrito no item 3.3.2, por meio de um balanço de quantidade de movimento sobre uma partícula esférica, considerando a força de arrasto do gás sobre a partícula, a força de atrito com o meio e a força gravitacional, Bohnet (1985) apresentou uma equação diferencial na qual se obtém a velocidade de partícula como resposta da integração ao longo do injetor que é mostrada a seguir:

$$u_p \frac{du_p}{dl} = -g \left( \frac{u_G - u_p}{u_s} \right)^2 + g \frac{u_p^2}{2} \frac{f}{d_i} + g\beta$$

Esta equação foi solucionada numericamente através do esquema preditor-corretor de quarta ordem de Adams. Este método foi escolhido devido sua robustez na convergência. Outros métodos mais simples como o Runge-Kutta de quarta ordem não se mostrou eficaz. Segue abaixo o código feito em Turbo Pascal 7.0 usado para solucionar a equação diferencial acima.

```

{*****}
{
    Universidade Estadual de Campinas
{
    Faculdade de Engenharia Mecânica
{
    Depto de Engenharia Térmica e de Fluidos
{*****}
{
    Programa para o cálculo da equação diferencial do
{
    movimento da partícula
{
    A resolução da equação diferencial do movimento da
{
    da partícula será feita através do método preditor-corretor
{
    de quarta ordem de Adams
{ Autor: Eng. Rogerio B Domingues e-mail: rogeriod@fem.unicamp.br
{ Julho de 2004
{ Campinas - SP - Brasil - Fone (019) 3788-3370
{*****}

```

```

Program Injetor;
uses CRT,printer;

```

```

    {parametros de entrada}
var desc, { descarga particula}
    rhop, { densidade particula}
    dp, {difmetro particula}
    t1, {temperatura no ponto 1}
    d7, {difmetro de saida do tubo adjunto}
    mi, {viscosidade dinfmica do g s}
    rhog, {densidade do g s}
    ls, {coef. de atrito entre as particulas}
    g, {aceleracao da gravidade}
    beta, {coef. de resistencia gravitacional}
    {parametros geom,tricos iniciais do injetor definidos pelo usuario}
    S, {distfncia entre os pontos 1 e 4 - regio de cruzamento}
    L34, {distfncia entre os pontos 3 e 4 - compr. do bocal convergente}
    L45, {distfncia entre os pontos 4 e 5 - compr. do tubo de mistura}
    L56, {distfncia entre os pontos 5 e 6 - compr. do difusor}
    L67, {distfncia entre os pontos 6 e 7 - compr. do tubo adjunto}
    angC, {ang. do bocal convergente}
    angD, {ang. do difusor}
    angS, {ang. de expansao do gas an cfmara de abastecimento}
    {parfmetros geometricos calculados a partir dos parametros previamente
definidos}
    d, {diam. generico}
    d1, {diam. de entrada do gas}
    d2, {diam. de entrada na cfmara de abastecimento}
    d3, {diam. maior do bocal convergente}
    d4, {diam. de entrada do tubo de mistura}
    d5, {diam. de saida do tubo de mistura}
    d6, {diam. de saida do difusor}
    m, {d2/d4}
    {parfmetros do escoamento do g s}
    Mgs, {descarga de gas atraves do silo}
    Mg2, {descarga de gas que atravessa diametro 2}
    Mtg, {descarga total de gas}
    Cg, {concentraçao do gas}
    ug24, {vel. media do gas por onde esco a mistura na cfmara de
abastecimento}
    ug45, {vel. media do gas por onde esco a mistura no tubo de mistura}

```

```

d24, {diam. m,dio de gas por onde escoo a mistura na camara de
abastecimento}
d45, {diam. m,dio de gas por onde escoo a mistura no tubo de mistura}
ug7, {vel. media do gas na saida do injetor}
ug5, {vel. media do gas na saida do tubo de mistura}
ug4, {vel. media do gas na entrada do tubo de mistura}
ug2, {vel. media do gas na entrada da cmara de abastecimento}
{parametros do escoamento da mistura}
usalt7,{vel. de salta#ao da partícula na saida do injetor}
usalt4,{vel. de salta#ao da partícula na entrada do tubo de mistura}
usalt5,{vel. de salta#ao da partícula na saida do tubo de mistura}
Cs, {carga de s#olidos}
up2, {vel. media do particulado na regioo de entrada do gas na camara de
abastecimento}
up4, {vel. media do particulado na entrada do tubo de mistura}
up5, {vel. media do particulado na saida do tubo de mistura}
up6, {vel. media do particulado na saida do difusor}
up7, {vel. media do particulado na saida do injetor}
{fatores de atrito}
fg45, {fator de atrito do g s no tubo de mistura}
fs45, {fator de atrito da mistura no tubo de mistura}
fg67, {fator de atrito do g s no tubo adjunto}
fs67, {fator de atrito da mistura no tubo adjunto}
{parametros geometricos e fluidodinamicos corridos}
ug24c,ug2c,ug4c,ug5c,ug7c,ug45c,
d2c,d3c,d4c,d5c,d7c,d6c,d24c,d45c,
up2c,up4c,up5c,up6c,up7c,
{variaveis relacionadas com o metodos de solu#ao da equa#ao diferencia
do movimento da partícula}
A,B,Alpha : real;
i,int,N:integer;
tx:text;
pos: array[1..2000] of real;
cur: array[1..2000] of real;
T,W : array [ 1..4 ] of real;
{varia#ao de pressao}
deltap17,padm12,padm24,padm45,padm57: real;
opcao :string;

```

```

{*****}
{
      Bloco de dados iniciais
}
{*****}

```

```

procedure entrada;
begin
  Mgs:=0;
  Descp:=0.08;
  rhop:=918;
  dp:=0.003;
  d7:=0.05;
  rhog:=1.225;
  mi:=0.0000185;
  ls:=0.0035;
  beta:=0.4;
  g:=9.81;
end;

```

```

procedure dados_construtivos_iniciais;
begin
  S:=0.015;
  L34:=0.030;
  {AngC:=29;}
  L45:=0.100;
  L56:=0.100;
  {AngD:=9;}
  L67:=0.030;
  {angS:=4.4};
  d6:=d7;
  d5:=0.0313;
  d4:=d5;
  d3:=0.0329;
  d2:=0.0239;
  d1:=0.0239;
  d24:=d2*d4*sqrt(4/(2*((d4*d4)+(d2*d2))));
  d45:=2*d24*d4*sqrt(1/(2*((d24*d24)+(d4*d4))));
  m:=d2/d4;
end;

{*****}
{ Bloco de funções específicas para o mov. da partícula
{ Vel. saltação ; Resolução da equação diferencial do movimento
{*****}

function us(descp,d,dp,rhop,rhog:real):real; { Velocidade de Salta#ao }
var valor:real;
begin
  us:= 2.8*exp(0.1*ln(descp))*exp(0.428*ln(d))
      *exp(-0.023*ln(dp))*exp(0.306*ln(rhop))*exp(-0.405*ln(rhog));
end;

function F ( T, Y: real ) : real;
var ug,us:real;
begin
  d:=0;
  us:=usalt7; { , a vel. de salta#ao que deve ser atingida na saida do
injetor}
  if ((B-A) < (S+L34)) then
    d:=d24;
    ug:=ug24;
  if ((B-A) > (S+L34)) and ((B-A) < (S+L34+L45)) then
    d:=d45;
    ug:=ug45;
  if ((B-A) > (S+L34+L45)) then
    ug:=ug7;
    d:=d7;
  F := (sqr((ug-y)/us)-(y*y*ls/2*g*d)-beta)*(g/y);
end;

procedure RK4 ( H, T0, W0 : real; var T1, W1 : real );
var K1, K2, K3, K4 : real;
begin
  T1 := T0 + H;
  K1 := H * F( T0, W0 );
  K2 := H * F( T0 + 0.5 * H, W0 + 0.5 * K1 );

```

```

    K3 := H * F(T0 + 0.5 * H, W0 + 0.5 * K2 );
    K4 := H * F( T1, W0 + K3 );
    W1 := W0 + ( K1 + 2.0 * ( K2 + K3 ) + K4 ) / 6.0
end;

function Sol(A,B,ALPHA: real; N: integer): real;
var H,T0,W0,result: real;
    I,J: integer;
begin
    H := ( B - A ) / N;
    T[1] := A;
    W[1] := ALPHA;
    for I := 1 to 3 do
    begin
    RK4( H, T[I], W[I], T[I+1], W[I+1] );
    end;
    for I := 4 to N do
    begin
    T0 := A + I * H;
    W0 := W[4]+H*(55.0*F(T[4],W[4])-59.0*F(T[3],W[3])
        +37.0*F(T[2],W[2])-9.0*F(T[1],W[1]))/24.0;
    W0:= W[4]+H*(9.0*F(T0,W0)+19.0*F(T[4],W[4])
        -5.0*F(T[3],W[3])+F(T[2],W[2]))/24.0;
    for J := 1 to 3 do
    begin
    T[J] := T[J+1];
    W[J] := W[J+1]
    end;
    T[4] := T0;
    W[4] := W0;
    result:=W0;
    writeln(tx, '      ', I, '      ', result:2:2);
    end;
    sol:=W0;
end;

{*****}
{      Cálculos fluidodinâmicos para a fase gasosa
{*****}

procedure descarga_minima;
begin
    d:=d7;
    usalt7:=us(descp,d,dp,rhop,rhog);
    d:=d24;
    usalt4:=us(descp,d,dp,rhop,rhog);
    d:=d45;
    usalt5:=us(descp,d,dp,rhop,rhog);
    ug7:=usalt7*(1+(sqrt(((0.5*sqr(usalt7))*(ls/d7))+beta)));
    Mtg:=0.0297;{rhog*ug7*pi*(sqr(d7)/4);}
    Mg2:=Mtg-Mgs;
    ug7:=Mtg/(rhog*pi*(sqr(d7)/4));
    Cs:=descp/Mtg;
end;

procedure velocidade_gas;
begin

```

```

    ug5:=ug7*sqr (d7/d5) ;
    ug4:=ug5;
    Mg2:=abs (Mtg-Mgs) ;
    ug2:=Mg2/ (rhog*pi*sqr (d2) /4) ;
    ug24:=(ug2+ug4) /2;
    ug45:=(ug24+ug5) /2;
    Cg:=Mg2/Mtg;
end;

{*****}
{          Cálculos fluidodinâmicos para a mistura gas-sólido
{*****}

procedure velocidade_particulado;
begin
    A:=0;
    B:=S+L34;
    N:=500;
    alpha:=0.02;
    up4:=Sol (A, B, alpha, N) ;
{*****}
    A:=S+L34;
    B:=S+L34+L45;
    N:=300;
    alpha:=up4;
    up5:=Sol (A, B, alpha, N) ;
{*****}
    A:=S+L34+L45;
    B:=S+L34+L45+L56+L67;
    N:=300;
    alpha:=up5;
    up7:=Sol (A, B, alpha, N) ;
end;

{*****}
{          Cálculo dos parâmetros do escoamento da mistura
{*****}

procedure parametros;
var Re45,Fr45,Re67,Fr67 : real;
begin
    Re45:=(rhog*ug45*d45) /mi;
    Fr45:=sqr (ug45) / (g*d45) ;
    if (30000 < Re45) or ( Re45 > 1000000) then fg45:=0.184/exp (0.2*ln (Re45));
    if (Re45 < 30000 ) then fg45:=0.3164/exp (0.25*ln (Re45));
    fs45:=(( (up4+up5) / (2*ug45) ) *ls)+(( 2*beta) / (( (up4+up5) / (2*ug45) ) *Fr45) );
end;

{*****}
{          Exibe Resultados
{*****}

procedure resultado;
begin

```

```

writeln(' DADOS INICIAIS ');
writeln;
writeln('d2=' ,d2:3:4,' ', 'S=' ,S:3:3);
writeln('d3=' ,d3:3:4,' ', 'L34=' ,L34:3:3);
writeln('d4=' ,d4:3:4,' ', 'L45=' ,L45:3:3);
writeln('d5=' ,d5:3:4,' ', 'L56=' ,L56:3:3);
writeln('d6=' ,d6:3:4,' ', 'L67=' ,L67:3:3);
writeln('d7=' ,d7:3:4);
writeln('d24=' ,d24:3:4);
writeln('d45=' ,d45:3:4);
writeln('m=' ,m:3:4);
writeln;
writeln('usalt4=' ,usalt4:3:2);
writeln('usalt5=' ,usalt5:3:2);
writeln('usalt7=' ,usalt7:3:2);
writeln;
writeln('ug2=' ,ug2:3:2,' ', 'up4=' ,up4:3:2);
writeln('ug5=' ,ug5:3:2,' ', 'up5=' ,up5:3:2);
writeln('ug7=' ,ug7:3:2,' ', 'up7=' ,up7:3:2);
writeln;
writeln('fg45=' ,fg45:3:7);
writeln('fs45=' ,fs45:3:7);
writeln;
writeln('Descarga total de g s:',Mtg:3:3);
writeln('Carga de Sólidos:',Cs:3:2);
writeln('Concentração do gas da linha principal:',Cg:3:2);

end;

{*****}
{
Programa Principal
{*****}

begin
assign(tx, 'VelP.txt');
rewrite(tx);
clrscr;
entrada;
dados_construtivos_iniciais;
descarga_minima;
velocidade_gas;
velocidade_particulado;
parametros;
resultado;
readln;
close(tx);
end.

```