



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA



# Estudo de um Sistema de Limpeza de Gases usando um Lavador Venturi de Seção Circular

*Marcella Santos de Carvalho Gama*  
*Uberlândia - MG*  
*2008*



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA



# Estudo de um Sistema de Limpeza de Gases usando um Lavador Venturi de Seção Circular

*Marcella Santos de Carvalho Gama*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, Área de Particulados.

*Uberlândia - MG  
2008*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G184e Gama, Marcella Santos de Carvalho, 1983-  
Estudo de um sistema de limpeza de gases usando um lavador venturi  
de seção circular / Marcella Santos de Carvalho Gama. - 2008.  
60f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Inclui bibliografia.

1. Lavador (Tecnologia química) - Teses. 2. Gases - Teses. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.07

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Química em 28 de fevereiro de 2008.

## BANCA EXAMINADORA

---

*Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno*  
Orientador - PPG - FEQUI/UFU

---

*Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira*  
PPG - FEQUI/UFU

---

*Profa. Dra. Vicelma Luiz Cardoso*  
PPG - FEQUI/UFU

---

*Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues*  
DEQ/UFSCAR

---

# Agradecimentos

*Aos meus pais, Milton e Marivone, obrigada pelos esforços e apoio, sempre presentes, que me permitiram concluir mais esta etapa.*

*Aos meus irmãos queridos, Caique e Guto, obrigada pela cumplicidade e pelo carinho.*

*Ao Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno, obrigada pela orientação e por acreditar no meu trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, agradeço a ajuda na conclusão deste trabalho.*

*À Cássia e ao Lucas, pela amizade e ajuda durante todo esse período.*

*Aos alunos de iniciação científica, Karen Cardoso, Natália Oliveira e Neiton Silva, obrigada pela ajuda na parte experimental.*

*Ao CNPq, agradeço a concessão da bolsa de estudo.*

---

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>x</b>
<b>Resumo</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Material Particulado . . . . .	3
2.2 Lavadores de Gases . . . . .	4
2.2.1 Lavadores Venturi . . . . .	5
2.2.2 Funcionamento dos Lavadores Venturi . . . . .	5
2.3 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores . . . . .	7
2.3.1 Impactação Inercial . . . . .	7
2.3.2 Interceptação Direta . . . . .	8
2.3.3 Difusão Browniana . . . . .	9
2.4 Modelagem de Lavadores Venturi . . . . .	10

---

2.4.1	Equação da Penetração do Jato . . . . .	10
2.4.2	Modelos de Eficiência de Coleta . . . . .	11
2.5	Artigos Experimentais com Lavadores Venturi . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>20</b>
3.1	Material Particulado . . . . .	20
3.2	O Líquido de Lavagem e a Injeção do Líquido . . . . .	22
3.3	Sistema de Alimentação do Pó . . . . .	23
3.4	Os Lavadores Venturi . . . . .	23
3.5	O Ciclone . . . . .	24
3.6	Procedimento Experimental . . . . .	25
3.7	Planejamento de Experimentos . . . . .	27
3.8	Modelos Teóricos para Determinação da Eficiência Global . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>29</b>
4.1	Análise Estatística dos Resultados Experimentais . . . . .	29
4.2	Curva Característica dos Lavadores Venturi . . . . .	33
4.3	Efeito da Penetração do Jato . . . . .	34
4.4	Influência da Velocidade do Gás e do Comprimento da Garganta . . . . .	35
4.5	Influência da Vazão de Líquido e do Tamanho da Partícula . . . . .	38
4.6	Comparação com Modelos Teóricos . . . . .	41
4.6.1	Cálculo da Eficiência Téorica do Modelo de JOHNSTONE <i>et al.</i> (1954) . . . . .	41
4.6.2	Cálculo da Eficiência Téorica do Modelo de CALVERT <i>et al.</i> (1972) . . . . .	42
4.6.3	Cálculo da Eficiência Téorica do Modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>49</b>
5.1	Conclusões . . . . .	49
5.2	Sugestões . . . . .	50
<b>A</b>	<b>Simulação Fluidodinâmica</b>	<b>51</b>

<b>Sumário</b>	<b>iv</b>
<b>B Resultados Experimentais</b>	<b>55</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>58</b>

---



---

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Vista esquemática de um lavador Venturi. . . . .	6
2.2	Mecanismo de coleta por impactação inercial. . . . .	7
2.3	Mecanismo de coleta por interceptação direta. . . . .	9
2.4	Mecanismo de coleta por difusão browniana. . . . .	9
3.1	Distribuição granulométrica cumulativa para material 2,21 $\mu\text{m}$ . . . . .	22
3.2	Distribuição granulométrica cumulativa para material 9,06 $\mu\text{m}$ . . . . .	22
3.3	Alimentador de pó do tipo prato giratório. . . . .	23
3.4	Lavadores Venturi de 132 mm (a) e de 99 mm (b). . . . .	24
3.5	Esquema do separador ciclônico. . . . .	25
3.6	Esquema da unidade experimental. . . . .	26
4.1	Gráfico de pareto. . . . .	31
4.2	Valores observados experimentalmente pelo valores preditos. . . . .	31
4.3	Distribuição de resíduos. . . . .	32
4.4	Superfície de resposta para a velocidade do gás e o comprimento da garganta. . . . .	32
4.5	Superfície de resposta para a velocidade do gás e a vazão de líquido. . . . .	33
4.6	Curva característica do lavador Venturi de 99 mm de comprimento de garganta. . . . .	34
4.7	Efeito da velocidade do gás na garganta para $Q_L = 340 \text{ mL/min}$ e $d_p = 2,21 \mu\text{m}$ . . . . .	36

4.8	Efeito da velocidade do gás na garganta para $Q_L = 340$ mL/min e $d_p = 9,06$ $\mu\text{m}$ .	36
4.9	Efeito da velocidade do gás na garganta para $Q_L = 500$ mL/min e $d_p = 2,21$ $\mu\text{m}$ .	37
4.10	Efeito da velocidade do gás na garganta para $Q_L = 500$ mL/min e $d_p = 9,06$ $\mu\text{m}$ .	37
4.11	Efeito da vazão de líquido na eficiência global para $V_G = 55,2$ m/s e $L_g = 99$ mm.	38
4.12	Efeito da vazão de líquido na eficiência global para $V_G = 55,2$ m/s e $L_g = 132$ mm.	39
4.13	Efeito da vazão de líquido na eficiência global para $V_G = 76,8$ m/s e $L_g = 99$ mm.	39
4.14	Efeito da vazão de líquido na eficiência global para $V_G = 76,8$ m/s e $L_g = 132$ mm.	40
4.15	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de JOHNSTONE para $Q_L = 340$ mL/min e $L_g = 132$ mm.	42
4.16	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de JOHNSTONE para $Q_L = 500$ mL/min e $L_g = 132$ mm.	42
4.17	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para $Q_L = 340$ mL/min, $L_g = 99$ mm e $d_p = 2,21$ $\mu\text{m}$ .	43
4.18	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para $Q_L = 340$ mL/min, $L_g = 132$ mm e $d_p = 9,06$ $\mu\text{m}$ .	44
4.19	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para $Q_L = 500$ mL/min, $L_g = 99$ mm e $d_p = 2,21$ $\mu\text{m}$ .	44
4.20	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para $Q_L = 500$ mL/min, $L_g = 132$ mm e $d_p = 9,06$ $\mu\text{m}$ .	45
4.21	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para $Q_L = 340$ mL/min e $d_p = 2,21$ $\mu\text{m}$ .	46
4.22	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para $Q_L = 340$ mL/min e $d_p = 9,06$ $\mu\text{m}$ .	46

---

4.23	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para $Q_L = 500$ mL/min e $d_p = 2,21 \mu\text{m}$ . . . . .	47
4.24	Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para $Q_L = 500$ mL/min e $d_p = 9,06 \mu\text{m}$ . . . . .	47
A.1	Perfis de velocidade do gás ( $v$ ) simulados no interior do lavador Venturi com comprimento de garganta de 99 mm. . . . .	53
A.2	Perfis de pressão estática ( $P$ ) simulados no interior do lavador Venturi com comprimento de garganta de 99 mm e respectivas quedas de pressão obtidas em cada uma das situações mencionadas: (A) $-\Delta P = 5825$ Pa, (B) $-\Delta P = 4024$ Pa, (C) $-\Delta P = 2085$ , (D) $-\Delta P = 1008$ e (E) $-\Delta P = 430$ . . . . .	54

---

## LISTA DE TABELAS

3.1	Distribuição de tamanho da rocha fosfática para um diâmetro médio de Sauter de $D_{[3,2]} = 2,21 \mu\text{m}$ . . . . .	21
3.2	Distribuição de tamanho da rocha fosfática para um diâmetro médio de Sauter de $D_{[3,2]} = 9,06 \mu\text{m}$ . . . . .	21
3.3	Valores dos parâmetros $d_{50}$ e $n$ do modelo RRB e do coeficiente de correlação. . . . .	22
3.4	Dimensões dos lavadores Venturi. . . . .	24
3.5	Variáveis e níveis do planejamento. . . . .	27
3.6	Matriz do planejamento experimental $2^4$ . . . . .	28
4.1	Resultados da matriz do planejamento experimental $2^4$ . . . . .	30
4.2	Resultado da análise estatística do planejamento. . . . .	30
4.3	Penetração ( $l^*$ ) e velocidade do jato ( $V_j$ ) para as condições de velocidade do gás e vazão de líquido. . . . .	34
4.4	Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT <i>et al.</i> (1972). . . . .	43
4.5	Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) para $L_g = 99 \text{ mm}$ . . . . .	48
4.6	Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) para $L_g = 132 \text{ mm}$ . . . . .	48
A.1	Dados de velocidade do gás (m/s) no interior da tubulação e respectivas quedas de pressão experimentais no tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm. . . . .	52

---

A.2	Condições de contorno e métodos numéricos no interior do tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm. . . . .	52
A.3	Função matemática estimada para os dados simulados de queda de pressão.	52
B.1	Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de 2,21 $\mu\text{m}$ e lavadores Venturi de 99 mm de comprimento de garganta.	55
B.2	Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de 2,21 $\mu\text{m}$ e lavadores Venturi de 132 mm de comprimento de garganta. . . . .	56
B.3	Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de 9,06 $\mu\text{m}$ e lavadores Venturi de 99 mm de comprimento de garganta.	56
B.4	Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de 9,06 $\mu\text{m}$ e lavadores Venturi de 132 mm de comprimento de garganta. . . . .	57

---

# NOMENCLATURA

$A_o$  - área do orifício de injeção de líquido, [cm]

C - fator de Cunningham, [ $\mu\text{m}$ ]

D - diâmetro médio da gota de Sauter, [ $\mu\text{m}$ ]

d - diâmetro da partícula, [ $\mu\text{m}$ ]

$d_{50}$  - diâmetro de corte da partícula, [ $\mu\text{m}$ ]

$d_o$  - diâmetro do orifício de injeção de líquido, [cm]

$d_p$  - diâmetro da partícula, [ $\mu\text{m}$ ]

f - fator empírico de Calvert, [*adimensional*]

k - fator empírico de Johnstone, [*adimensional*]

$l^*$  - penetração do jato, [mm]

$L_g$  - comprimento da garganta, [mm]

$m_{alimentada}$  - quantidade de material particulado alimentado na linha, [g]

$m_{coletada}$  - quantidade de material particulado recolhido no *underflow* do ciclone, [g]

N - parâmetro da equação de Leith e Cooper, [*adimensional*]

$N_o$  - número de orifícios de injeção de líquido, [*adimensional*]

n - expoente do modelo Sigmóide, [*adimensional*]

p - expoente do modelo Rosin-Rammler-Bennett, [*adimensional*]

$Q_G$  - vazão de gás, [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$Q_L$  - vazão de líquido, [mL/min]

$V_G$  - velocidade do gás na garganta [m/s]

$V_j$  - velocidade do jato, [m/s]

$\Delta P_G$  - queda de pressão na garganta do Venturi, [cmH<sub>2</sub>O]

X - fração mássica acumulada, [adimensional]

### Símbolos Gregos

$\beta$  - fator de correção de Calvert para  $\Delta P_G$

$\sigma$  - tensão superficial, [dina/cm]

$\mu_G$  - viscosidade do gás, [kg/ms]

$\mu_L$  - viscosidade do líquido, [kg/ms]

$\rho_G$  - densidade do gás, [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_L$  - densidade do líquido, [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  - densidade da partícula, [kg/m<sup>3</sup>]

$\psi$  - parâmetro de impactação inercial, [adimensional]

$\eta$  - eficiência de coleta, [adimensional]

---

## RESUMO

O lavador Venturi é um equipamento simples, de custo médio baixo e bastante eficiente, aplicado na remoção de material particulado e no controle da poluição. O objetivo deste estudo foi avaliar um sistema de limpeza de gás utilizando lavadores Venturi de seção circular na remoção de partículas de uma corrente gasosa. O material particulado usado nos testes foi o concentrado fosfático, com diâmetros médios de 2,21 e 9,06  $\mu\text{m}$ . Eficiências globais de coleta foram obtidas realizando-se experimentos com velocidade do gás de 55,2 e 76,8 m/s, vazão de líquido de 340 e 500 mL/min e comprimento de garganta de 99 e 132 mm. Um planejamento experimental  $2^4$  foi feito e verificou-se que todas as variáveis e as interações da velocidade do gás com o comprimento da garganta e com a vazão de líquido tiveram efeito na remoção de partículas da corrente gasosa. A coleta das partículas de 2,21  $\mu\text{m}$  apresentou uma faixa de eficiência de 53,8 a 86,8%, enquanto 53,4 a 96,5% de remoção foram identificadas para as partículas de 9,06  $\mu\text{m}$ . A análise dos resultados mostrou que, como consequência de aumentos na velocidade do gás e na vazão de líquido, a eficiência de coleta crescia, já que quanto maior a vazão do líquido de lavagem maior a quantidade de água para ser atomizada, atomização essa que também aumentava com velocidades de gás mais altas. Outra observação foi que, com o aumento do comprimento da garganta e da velocidade do gás, o percentual de remoção de rocha fosfática era maior, uma vez que o tempo de contato entre o pó e o líquido crescia com uma garganta mais comprida e o aumento da velocidade do gás proporcionava, mais uma vez, melhor atomização do jato. Em relação aos diferentes tamanhos de partículas, notou-se que as de diâmetro médio de 9,06  $\mu\text{m}$  eram removidas do fluxo de gás com mais eficiência que as de 2,21  $\mu\text{m}$ , pois partículas de diâmetro maior têm maior inércia, o que favorece o mecanismo de coleta de impactação inercial, predominante em lavadores Venturi. Os resultados experimentais de eficiência global de coleta ainda foram comparados com os modelos teóricos de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1972) e CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005). O modelo de JOHNSTONE *et al.* subestimou os valores experimentais de coleta, enquanto os outros dois modelos superestimaram. Ainda assim, o modelo de JOHNSTONE *et al.* foi o que apresentou melhor ajuste, porque seguiu a tendência de aumento da eficiência de coleta em função de um acréscimo na velocidade do gás.

**Palavras-chave:** lavador Venturi, limpeza de gases, eficiência global de coleta de partículas.



---

# ABSTRACT

Venturi scrubbers are simple, low cost and highly applicable equipments. They are used in the industry as gas cleaners and in other to control the pollution. The objective of this work was to evaluate a gas cleaning system using Venturi scrubbers with circular section to remove particles off a gas flux. The tests were realized with 2,21 and 9,06  $\mu\text{m}$  particles of phosphate power. The global collection efficiency was determined for 55,2 and 76,8 m/s of gas velocity, 340 and 500 mL/min of liquid flow and for 99 and 132 mm of length throat. From an experimental design  $2^4$  it was obtained that all variables studied and the gas velocity's interaction with liquid flow and with length throat had influence over the collection efficiency. For 2,21  $\mu\text{m}$  particles the efficiency range was from 53,8 to 86,8% while for 9,06  $\mu\text{m}$  particles it was from 53,4 to 96,5%. The results' analysis showed that as bigger the gas velocity and the liquid flow are, higher the efficiency gets. It happens because there are more quantity of washing liquid to be atomized with the liquid flow increase. This atomization gets better with high gas velocities taxes. Another point observed was that for longer length throat and higher gas velocity, the collection efficiency grows. What occurs here is that the particles's residence time inside the throat was bigger for 132 mm length throat than for 99 mm. And more time, a gas acceleration resulted on better jet's atomization. The study of different particles sizes showed that 9,06  $\mu\text{m}$  were removed more efficiently than particles with medium diameter of 2,21  $\mu\text{m}$ . Particles with bigger diameters present more inertia, which facilitates the action of the inertial impaction, the collection mechanism that predominates in Venturi scrubbers. The jet penetration was another parameter analysed and it represented the expected behavior: as bigger the liquid flow gets and lower the gas velocity, higher was the jet penetration length. The experimental results of global collection efficiency were compared with theoretical models like JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1972) and modified CALVERT (RIBEIRO, 2005). CALVERT *et al.* and modified CALVERT models overestimated the values of dust collection efficiency and although JOHNSNTONE *et al.*'s model has underestimated those values, it was the one that better fitted the experimental results, because it showed that the collection efficiency was higher for high gas velocities.

**Keywords:** Venturi scrubbers, gas cleaners, global particles collection efficiency.

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

A atuação de setores industriais, como metalúrgicas, indústrias de fertilizantes, papel, tintas, óleos, cimento, farinhas, entres vários outros leva a impactos ambientais quando se diz respeito não somente à descarga de águas residuais, geração de rejeitos e resíduos sólidos, como também à emissão de gases e partículas na atmosfera. De acordo com a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) N°382/2006, emissão é o lançamento na atmosfera de qualquer forma sólida, líquida ou gasosa. As instalações e processos químicos como também os equipamentos, situados em local fixo, liberam matéria para o meio ambiente através das chamadas emissões pontual e fugitiva. A primeira ocorre quando uma fonte provida de dispositivo para dirigir ou controlar (chaminé ou duto) as matérias sólida, gasosa ou líquida lança esses poluentes para a atmosfera. Já a emissão fugitiva é ressaltada quando esta emissão não provém de uma fonte responsável por dirigir e controlar seu fluxo de matérias, como por exemplo, quando a ineficiência de um equipamento ou uma má vedação na tubulação resultam em vazamentos.

A emissão de partículas na faixa de diâmetro de  $0,5 \mu\text{m}$  a  $5,0 \mu\text{m}$  é particularmente prejudicial ao sistema respiratório, pois penetram e se depositam no em partes do aparelho respiratório. Por isso, preocupação dos órgãos ambientais em relação à qualidade do ar vem aumentando e, assim, as normas e leis ambientais estão cada vez mais rígidas. Dessa forma, restam às indústrias se adequarem a estas normas de melhoria estabelecidas. É neste contexto que surgem os equipamentos de limpeza de gases, como os lavadores Venturi. Estes são equipamentos são aplicados no controle da poluição atmosférica e removem de forma eficiente material particulado numa larga faixa granulométrica, além

de serem compactos e de construção simples. Esses lavadores de gases removem o pó indesejável do fluxo gasoso através da atomização de um jato líquido e da atuação de mecanismos de coleta de partículas. O principal objetivo desses equipamentos é gerar uma boa distribuição daquele líquido atomizado para que aumente a probabilidade de choque entre as gotas e as partículas de pó.

Na literatura encontram-se muitos trabalhos que avaliaram o efeito que variáveis como velocidade do gás, vazão de líquido, diâmetro e comprimento da garganta, penetração do jato líquido, distribuição das gotas ao longo da garganta do lavador, fração de filme líquido e tamanho do material particulado e das gotas têm na eficiência de coleta dos lavadores Venturi. O trabalho de MEILI (2006) foi o ponto de partida dos estudos sobre lavadores de gases na Faculdade de Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia. MEILI (2006) utilizou lavadores Venturi de seção circular com diferentes diâmetros e comprimentos de garganta. Operando com velocidades de gás de 4, 7 e 10 m/s, ele relatou percentuais de 11 a até 100% de remoção de partículas. Assim, este presente trabalho surgiu com o intuito de dar continuidade à essa linha de estudo. Para isso, optou-se por trabalhar apenas com os lavadores de menor diâmetro de garganta que MEILI (2006) observou serem mais eficientes na separação do pó que aqueles de maior diâmetro de garganta. Os lavadores Venturi de seção circular foram confeccionados de acrílico pela empresa Casa do Acrílico, no Rio de Janeiro. O material particulado usado nos experimentos foi o pó de rocha fosfática e foi escolhido por ser um insumo essencial para a produção de fertilizantes fosfatados e para consumo de animais e que, senão manuseado de forma adequada, pode causar doenças respiratórias.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a eficiência de separação de um sistema de limpeza de gases utilizando um lavador Venturi de seção circular. Aproveitando-se também para avaliar o efeito que a variação da velocidade do gás, da vazão do líquido, do comprimento da garganta do Venturi e que partículas com diâmetro médio menor que 10  $\mu\text{m}$  tinham sobre a eficiência global de coleta dos lavadores. Os modelos teóricos de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1972) e CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) foram testados e comparados com os resultados das eficiências experimentais encontradas neste estudo.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Material Particulado

As partículas com diâmetro aerodinâmico menor que  $10\ \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ) são finas, inaláveis e, conseqüentemente, prejudiciais aos seres humanos. Sabe-se que partículas maiores que  $10\ \mu\text{m}$  ficam retidas no nariz, na faringe, na laringe ou na traquéia, enquanto partículas menores podem chegar aos pulmões e sedimentar nos alvéolos e na região traqueobronquial (HINDS, 1982, *apud* LIMA, 2007).

Este tipo de material sólido ou líquido fica suspenso no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça e fuligem. Suas principais fontes são os processos de combustão (industrial ou de veículos automotivos) e os advindos de fontes naturais.

Dessa forma, com o intuito de controlar a emissão de partículas para a atmosfera e proteger o meio ambiente em nível nacional, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) edita normas administrativas relacionadas à poluição do ar. No ano de 1986, a Resolução CONAMA 018 instituiu o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por veículos automotores estabelecendo limites máximos de emissão para veículos e motores novos. Mais recente, a Resolução CONAMA 382 de 2006 ([www.mma.gov.br/port/conama](http://www.mma.gov.br/port/conama)) explicitou a necessidade do controle da poluição da fonte geradora por meio de equipamentos de controle do tipo "fim de tubo" ou processos menos poluentes, principalmente devido à disponibilidade de tecnologia existente para redução da emissão para diversos processos produtivos. Dentre os equipamentos existentes, os lavadores de gases são uma

opção no controle da poluição ambiental.

## 2.2 Lavadores de Gases

O lavador de gás é um dispositivo empregado no controle da poluição atmosférica, na recuperação de materiais, no resfriamento e na adição de líquido ou vapor nas correntes gasosas. As partículas sólidas presentes em um fluxo de gás são coletadas através do contato direto com um líquido atomizado, geralmente a água.

Os equipamentos usados no controle de emissão de partículas baseiam-se em forças eletrostáticas e inerciais para a coleta do particulado. Eles são caracterizados nos seguintes grupos (FAYED e OTTEN,1984 *apud* MARTINS COSTA, 2002):

- Torres de *spray*
- Lavadores de orifício
- Lavadores ciclônicos
- Lavadores Venturi
- Lavadores de leito fibroso

Quando se opta por trabalhar com um equipamento de controle de emissão de partículas, é importante considerar suas vantagens e desvantagens. Como vantagens de um lavador de gases têm-se:

- Possibilidade de trabalhar com partículas inflamáveis e explosivas;
- Absorção de gás e coleta de partícula em uma única unidade;
- Resfriamento de gases quentes;
- Variação da eficiência de coleta;
- Neutralização de partículas e gases corrosivos;
- Materiais higroscópicos podem ser manuseados sem dificuldades;
- Equipamentos de baixo custo inicial, de fáceis instalação e manutenção e de geometria simples e compacta.

Já como desvantagens, estes coletores apresentam:

- Alto potencial para problemas de corrosão;
- O efluente líquido requer tratamento dependendo do contaminante;
- O particulado coletado pode ser contaminado e não reciclável;
- Requer proteção contra resfriamento e o gás de saída pode precisar de aquecimento para evitar foligem visível;
- Alto consumo de energia (altas quedas de pressão).

### 2.2.1 Lavadores Venturi

Para se remover grandes quantidades de partículas micrômicas deve-se considerar o uso de lavadores Venturi. Os lavadores de gases Venturi são atomizadores de líquido. Eles funcionam trabalhando com forças de impactação para atomizar o fluxo de líquido em pequenas gotas (SCHIFFTNER E HESKETH, 1996). A intenção é gerar uma distribuição uniforme destas gotas para elevar a probabilidade da partícula de pó se chocar com elas.

Entretanto, produzir pequenas gotas é muito difícil e, mais complicado ainda, é conseguir uma distribuição uniforme destas gotas. Para se corrigir essas dificuldade, é comum utilizar a entrada de líquido na forma de *spray* antes da garganta e injeção direta de finas camadas de líquido (que facilitam sua quebra em pequenas gotas) na garganta do lavador.

Nos lavadores de gases Venturi costuma-se operar com altas velocidades através da injeção de água a baixa pressão na sua garganta, onde o ar passa usualmente entre 45,72 e 152,40 m/s. Este tipo de lavador pode obter eficiência de até 98% para partículas de diâmetros maiores que  $0,5 \mu\text{m}$  a altas velocidades de gás na garganta e alta queda de pressão. Existem também os lavadores de gases do tipo jato Venturi, que diferem do anterior na injeção da água a alta velocidade, na garganta do lavador (COOPER, ALLEY, 2002).

### 2.2.2 Funcionamento dos Lavadores Venturi

Um lavador de gases do tipo Venturi comum consiste em um tubo de seção retangular ou circular, com três partes distintas: seção convergente, garganta e seção divergente. Na Figura 2.1 observa-se o esquema de um lavador Venturi.



Figura 2.1: Vista esquemática de um lavador Venturi.

O processo de limpeza do gás se dá da seguinte forma: o gás sujo entra no lavador pela seção convergente e, em função do estreitamento do duto, ele atinge sua velocidade máxima na garganta. Em seguida, na seção divergente, o gás sofre uma desaceleração.

Para a limpeza do gás, utiliza-se um líquido, normalmente a água. Esta pode ser injetada de diversas formas no lavador, entretanto, a injeção por meio de orifícios localizados na garganta do Venturi é a mais usada. Ao passar pelos orifícios, o líquido assume a forma de jatos. A aceleração e desaceleração das gotas formadas é fruto da velocidade relativa entre o gás e as gotas, que permite o aparecimento de uma força de arraste sobre as gotas (GONÇALVES, 2000).

Quando o gás perde energia de pressão, ele gera energia suficiente tanto para atomizar o líquido quanto para acelerar as gotas. Na seção convergente, o gás ganha velocidade, transformando energia de pressão em energia cinética, ou seja, o gás perde pressão. Já no difusor, acontece o contrário. Em função do gradiente de pressão adverso, a camada limite sofre um aumento considerável, que pode levá-la a uma separação da parede. Como o escoamento nos lavadores Venturi é turbulento e também, devido às dissipações viscosas, nem toda a energia cinética da seção convergente chega à seção divergente em forma de pressão. Então, a pressão na saída do Venturi é menor que na entrada e esta perda de carga precisa ser compensada por um soprador (GONÇALVES, 2000).

A atomização do líquido faz com que a sua área superficial aumente muito e isto, juntamente com a turbulência do escoamento e a alta velocidade do gás, facilitam a transferência de massa entre o gás e o líquido, assim como a coleta do material particulado pelas gotas.

## 2.3 Mecanismos de Coleta de Partículas em Lavadores

Para a coleta de partículas, os equipamentos chamados de coletores de partículas baseiam-se em forças inercial e eletrostática. Pode-se citar os mecanismos inercial, gravitacional, difusional, interceptação direta e eletrostático. Das formas inerciais que atuam na coleta, as predominantes são a impactação inercial, a interceptação direta e a difusão browniana, que foram descritos a seguir. Mais de um destes mecanismos pode atuar na coleta das partículas.

### 2.3.1 Impactação Inercial

O mecanismo de impactação inercial é considerado o principal que ocorre em lavadores Venturi. As gotas recém-formadas, além de estarem praticamente paradas em relação ao gás, são, em média, maiores que as partículas de pó. As moléculas de gás leves e, portanto, com menos quantidade de movimento desviam-se com facilidade das gotas ao se depararem com elas. Já, as partículas, com maior massa e inércia, não conseguem mudar rapidamente sua trajetória e chocam-se com alguma gota (GONÇALVES, 2000). Esse comportamento pode ser visto na Figura 2.1.

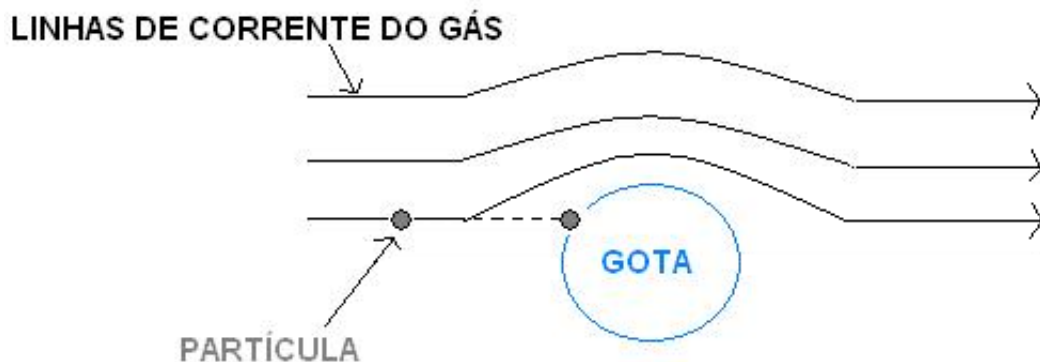


Figura 2.2: Mecanismo de coleta por impactação inercial.

Desta forma, partículas maiores são coletadas mais facilmente do que partículas menores devido à sua maior inércia e a eficiência de coleta aumenta à medida que a diferença da velocidade entre a partícula no gás e na gota aumenta. Para partículas com diâmetros maiores que  $10 \mu\text{m}$ , este processo de coleta é bastante eficiente. A eficiência de impactação é diretamente proporcional a um parâmetro de impactação, que é igual a metade no número de Stokes e representa a força necessária para parar uma partícula movendo-se inicialmente a uma dada velocidade a a resistência viscosa apresentada pelo



fluido (GONÇALVES, 2000). A medida que o valor desse parâmetro aumenta, a eficiência de impactação inercial aumenta.

$$\psi = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_G}{18 \cdot \mu_G D_d} \cdot C \quad (2.1)$$

Sendo  $\rho_p$  a densidade da partícula,  $d_p$  o diâmetro da partícula,  $V_G$  a velocidade do gás na garganta,  $\mu_G$  a viscosidade do gás,  $D^d$  o diâmetro médio de Sauter da gota e C o fator de correção de Cunningham.

$$C = 1 + \frac{1,65 \cdot 10^{-7}}{d_p} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.1, deve-se usar os valores das variáveis em S.I..

O diâmetro médio de Sauter da gota líquida foi calculado pela correlação empírica de NUKIAMA e TANASAWA de 1938 (*apud* MARTINS COSTA, 2002):

$$D = \frac{58600}{V_G} \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0,5} + 597 \cdot \left( \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma}} \right)^{0,45} \cdot \left( 1000 \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1,5} \quad (2.3)$$

Sendo  $\sigma$  a tensão superficial,  $\rho_L$  a densidade do líquido e  $\mu_L$  a viscosidade do líquido.

Na Equação 2.3, deve-se usar os valores em CGS para se obter o diâmetro da gota em  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.2 Intercepção Direta

Já a coleta por intercepção direta apresenta alta eficiência para partículas menores que  $10 \mu\text{m}$ , que devido a suas pequenas massas tendem a fluírem com o fluxo de gás. Estas partículas menores conseguem acompanhar o caminho das linhas de corrente, desviando-se da gota em seu caminho. Entretanto, mesmo que o centro de gravidade da partícula não tenha atingido a superfície da gota, a coleta acontece quando a linha de corrente estiver a uma distância da gota menor ou igual ao raio da partícula.

A partir do modelo da esfera isolada, TIEN (*apud* RIBEIRO, 2005) deduziu a equação de eficiência de coleta para esse mecanismo:

$$\eta = 1,5 \cdot \left( \frac{d_p}{D_d} \right) \quad (2.4)$$



Figura 2.3: Mecanismo de coleta por interceptação direta.

### 2.3.3 Difusão Browniana

Um mecanismo dominante para partículas muito pequenas e especialmente significativo para o intervalo de tamanho de 0,01 a 0,1  $\mu\text{m}$  é a difusão browniana.



Figura 2.4: Mecanismo de coleta por difusão browniana.

Estas partículas são tão pequenas que a ordem de grandeza delas aproxima-se ao tamanho das moléculas do gás. Assim, em função de seu movimento irregular e aleatório, as partículas de pó chocam-se constantemente com as moléculas de gás e podem acabar colidindo com a gota.

Ainda existem processos de coleta de partículas como força centrífuga, condensação, atração eletrostática e deposição gravitacional. A eficiência de cada um destes mecanismos depende do diâmetro das partículas e das gotas, das condições operacionais do lavador e da turbulência do sistema (TAHERI *et al.*, 1969 *apud* MARTINS COSTA, 2002).

Alguns autores usaram equações para entender melhor como estes mecanismos de coleta e cada uma das variáveis como comprimento da garganta, velocidade do gás, vazão de líquido, fração de filme líquido, por exemplo, afetam na eficiência de remoção de

partículas por parte dos lavadores de gases do tipo Venturi.

## 2.4 Modelagem de Lavadores Venturi

A modelagem de lavadores Venturi é realizada com o objetivo de explicar os mecanismos que operam nesses equipamentos e também de prever a eficiência de coleta como função das condições operacionais e de projeto do Venturi.

### 2.4.1 Equação da Penetração do Jato

A penetração do jato líquido tem efeito importante na eficiência de lavadores Venturi, porque são as características do jato como velocidade, penetração, diâmetro e trajetória que determinam as características da gota (diâmetro, quantidade e distribuição), que são as responsáveis pela coleta do material particulado do fluxo gasoso.

ADELBERG (1967) (*apud* VISWANATHA, 1983) definiu o comprimento da penetração do jato como a distância máxima que o jato líquido penetra transversalmente no fluxo de gás antes de se quebrar em gotas.

De acordo com a equação de VISWANATHAN *et al.* (1983) é possível calcular teoricamente a penetração do jato na garganta do Venturi.

$$l^* = \frac{0,1145 \cdot \rho_L \cdot V_j \cdot d_o}{\rho_G \cdot V_G} \quad (2.5)$$

Sendo que  $l^*$  é a penetração do jato,  $\rho_L$  a densidade do líquido,  $V_j$  velocidade do jato (calculada pela Equação (2.6)),  $d_o$  diâmetro do orifício de injeção do líquido,  $\rho_G$  a densidade do gás e  $V_G$  é a velocidade do gás.

$$V_j = \frac{Q_l}{A_o} = \frac{Q_l}{\frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot N_o} \quad (2.6)$$

Sendo  $Q_L$  a vazão de líquido,  $A_o$  a área do orifício de injeção de líquido, e  $N_o$  o número de orifícios de injeção de líquido.

### 2.4.2 Modelos de Eficiência de Coleta

Dentre as variáveis que influenciam na eficiência de coleta, pode-se destacar a velocidade do gás na garganta ( $V_g$ ), a penetração do jato ( $l^*$ ), o comprimento ( $L_g$ ) e o diâmetro da garganta ( $D_g$ ), o diâmetro das partículas ( $d_p$ ), a razão volumétrica líquido/gás ( $L/G$ ), a distribuição do tamanho da gotas e a dispersão das mesmas na garganta do lavador.

A seguir estão descritas algumas correlações utilizadas na determinação da eficiência de coleta.

#### Modelo de JOHNSTONE *et al.*, 1954

JOHNSTONE *et al.* (1954) estudaram teoricamente a importância que os mecanismos de coleta inercial, difusional e eletrostática apresentariam na operação de lavadores Venturi. Suas análises mostraram que o mecanismo de impactação inercial era o predominante nestes equipamentos. Os ensaios foram realizados em lavadores com diâmetros de garganta de 28,575 e 38,100 mm e as velocidades de gás trabalhadas foram de 60,960 e 201,168 m/s.

A equação de JOHNSTONE *et al.* é simples, o que proporciona facilidade em seu uso.

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-k \cdot Q_L}{Q_G \cdot \sqrt{\psi}}\right) \quad (2.7)$$

As vazões de líquido e de gás são dada respectivamente por  $Q_L$  e  $Q_G$  respectivamente, sendo  $\psi$  o parâmetro de impactação inercial adimensional dado pela Equação (??) e k um fator empírico de JOHNSNTONE com valor usual entre 13 e 27.

Neste modelo o parâmetro de impactação inercial (Eq. 2.1) inclui o diâmetro da partícula, o que torna possível o cálculo de eficiências fracionárias de um pó com determinada distribuição granulométrica.

#### Modelo de CALVERT *et al.*, 1972

Neste modelo a eficiência de coleta foi considerada como função do parâmetro inercial ( $\psi$ ), igual a metade do número de Stokes.

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{2 \cdot Q_L \cdot V_G \cdot \rho_L \cdot D}{55 \cdot Q_G \cdot \mu_G} \cdot F(\psi, f)\right] \quad (2.8)$$

Aqui  $F$  é função de  $f$  e do parâmetro de impactação inercial  $\psi$  e é representada por:

$$F(\psi, f) = \frac{1}{2\psi} \left[ -0,7 - 2\psi \cdot f + 1,4 \cdot \ln \left( \frac{2\psi \cdot f + 0,7}{0,7} \right) + \left( \frac{0,49}{0,7 + 2\psi} \right) \right] \quad (2.9)$$

A variável  $f$  desempenha o papel de um fator empírico de ajuste. Segundo GALVÃO FILHO (1979) (*apud* MARTINS COSTA, 2002), o valor de  $f$  de 0,2 é uma boa estimativa para poeira hidrofóbica e 0,45 para hidrofílica.

De acordo com RUDNICK *et al.* (1986), mesmo que a expressão algébrica do modelo de CALVERT *et al.* (1972) apresente facilidade na sua aplicação, suas predições são muito dependentes da escolha do parâmetro  $f$ .

#### Modelo de LEITH e COOPER, 1980

Após um tratamento matemático da teoria da penetração de CALVERT (*apud* MARTINS COSTA, 2002), LEITH e COOPER propuseram a equação 2.10 para avaliar a eficiência de coleta de um lavador Venturi.

$$\eta = 1 - \exp[-0,124 \cdot \left( \frac{f^2}{\beta} \right) \cdot N] \quad (2.10)$$

Sendo  $f$  o fator empírico usado por CALVERT (1972),  $\beta$  o fator de correção de CALVERT (1972) para a queda de pressão na garganta do Venturi e  $N$  é dado pela expressão 2.11.

$$N = \frac{C \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot \Delta P_G}{18 \cdot \mu_G^2} \quad (2.11)$$

A queda de pressão na garganta do Venturi,  $\Delta P_G$  é dada por:

$$\Delta P_G = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot V_G^2 \cdot \rho_L \cdot \frac{Q_L}{Q_G} \quad (2.12)$$

#### Modelo de CALVERT Modificado, 2005

Diante de seus resultados, RIBEIRO (2005) propôs um novo modelo para ajustar os pontos teóricos aos experimentais. Assim, baseando-se no modelo de CALVERT *et al.*

(1972), por ser um modelo clássico, propôs uma modificação no parâmetro  $f$  em função do comprimento da garganta ( $L_g$ ). O modelo foi ajustado para lavadores Venturi de seção retangular, com comprimentos de garganta de 6,5, 12,5 e 18,5 cm, velocidade de gás de 64 m/s e vazões de líquido de 300, 600 e 900  $cm^3/min$ .

$$f = 0,5161.L_g^{0,3005} \quad (2.13)$$

A validade deste modelo foi verificada pela boa concordância dos valores experimentais de eficiência global observados com valores estimados pelo modelo de CALVERT modificado.

## 2.5 Artigos Experimentais com Lavadores Venturi

BEHIE e BEECKAMANS (1974) demonstraram que o diâmetro e a localização do orifício de injeção afetam na eficiência de coleta de lavadores Venturi. Eles avaliaram três diferentes arranjos de dois sistemas de injeção de líquido com a velocidade do gás na faixa de 23,4 a 49,7 m/s. O sistema 1 tinha orifício de injeção de 0,5 mm e o 2, de 2,0 mm. O material particulado tinha tamanhos de 0,8, 1,6, 2,9 e 5,0  $\mu m$ . Dentre as várias conclusões pertinentes que puderam ser obtidas, a mais importante foi a de que a teoria em algumas circunstâncias subestima a eficiência de coleta especialmente para as partículas maiores. Os cálculos mostraram que para partículas de 3,0  $\mu m$  ou maiores, o tamanho da partícula não interfere na eficiência de coleta teórica. Já para partículas de 5,0  $\mu m$  a eficiência de coleta aumentou consideravelmente quando comparada com a eficiência de remoção de partículas com diâmetro de 2,9  $\mu m$  sob as mesmas condições. As razões destes comportamentos foram relacionadas com o mecanismo do jato. Os resultados mostraram que a taxa de aceleração da gota foi muito menor que a esperada. Esta aceleração lenta das gotas ocorreria por um longo período de tempo, o que resultaria no aumento da captura do aerossol com as maiores partículas. Com as partículas menores, a lenta aceleração das gotas resultaria em uma eficiência de coleta por impactação tão baixa que a eficiência de coleta global do lavador seria negativamente afetada. Estas observações foram notadas para as baixas velocidades de gás. Finalmente, avaliou-se que a eficiência de coleta foi maior para o sistema de injeção com orifícios de 0,5 mm que para o sistema com orifícios de 2,0 mm. De uma forma geral, a injeção de líquido por apenas um lado do lavador resultou em eficiências mais altas. O número reduzido de orifícios de injeção implicou em um acréscimo da velocidade de injeção do líquido e também na pressão de injeção.

O objetivo de PLACEK e PETERS (1981) estudaram o efeito de algumas variáveis na performance de um lavador de gás do tipo Venturi. As condições operacionais es-

colhidas representavam valores tipicamente encontrados em aplicações industriais. As variáveis razão volumétrica líquido-gás e velocidade do gás foram as que apresentaram maior influência na performance do lavador. Observou-se que, com o aumento da razão volumétrica líquido-gás o diâmetro médio de Sauter aumentava, resultando em um número de Stokes menor. Este efeito também afetou diretamente no aumento da concentração das gotas. Notou-se que o diâmetro médio de Sauter sofre influência da velocidade do gás. Para uma razão líquido-gás de 0,008 e características de injeção de líquido fixas, houve um acréscimo na eficiência de coleta com o aumento da velocidade do gás. Isto ocorreu porque segundo a equação de NUKIYAMA e TANASAWA (1938) o *spray* quebrou-se em mais e menores gotas com o aumento da velocidade do gás. Outra razão também é que, como mais gotas foram formadas, a concentração das mesmas aumentou, o que afetou positivamente na eficiência de coleta. O comprimento da garganta do lavador Venturi foi também uma das variáveis estudadas. Três comprimentos de garganta foram avaliados: 0,1, 0,3 e 1,0 m e viu-se que com o aumento do comprimento, a eficiência de coleta era maior, já que o tempo de contato entre a gota e partícula era maior.

VISWANATHAN *et al.* (1983) estudaram o comprimento da penetração do jato em lavadores Venturi. Este parâmetro foi definido por ADELBERG (1967) (*apud* VISWANATHAN, 1983) como a distância máxima que um jato líquido penetra em um fluxo de gás antes de se quebrar em gotas. Neste trabalho, as características da penetração do jato foram determinadas a partir de fotografias tiradas na direção perpendicular à da injeção do líquido. A face em que a câmera focalizava continha uma escala para facilitar a medição do comprimento do jato. O líquido de lavagem era distribuído em 17 orifícios ao longo das faces da garganta do lavador. Orifícios de 1,397, 2,108, 2,565 e 3,860 mm foram usados. A velocidade do gás variava de 36 a 125 m/s enquanto a velocidade de injeção do líquido ia de 1,2 a 18 m/s. Os autores perceberam que foi impossível calcular o comprimento do jato com base nas fotografias, já que não identificaram claramente o ponto inicial de quebra do cilindro líquido. Portanto, o cálculo foi feito a partir de uma equação que mostrou que o aumento da razão volumétrica líquido-gás ajudava o jato a atingir o centro do lavador com uma boa cobertura da garganta. Entretanto, eles concluíram que o aumento indiscriminado dessa razão volumétrica líquido-gás poderia diminuir a eficiência de coleta de partículas quando a taxa de filme líquido aumentava como resultado de penetrações excessivas do jato.

RUDNICK *et al.* (1986) obtiveram resultados experimentais para várias condições operacionais e os comparou com a predição de importantes modelos teóricos de eficiência. Foram usados três lavadores Venturi de seção circular confeccionados de acrílico. Os lavadores tinham diâmetro de garganta de 32, 54 e 76 mm. Como líquido de lavagem utilizou-se água destilada e este era introduzido nos lavadores de quatro formas distintas: (1) introduziu-se água a 29 mm acima da entrada da seção convergente por meio de uma

fenda circunferencial de 0,6 mm de largura na parede do duto; (2) a água era introduzida para baixo na parede 15 mm acima da entrada da seção convergente através de uma abertura anular de 1,0 mm; (3) através de uma abertura concêntrica de 14,2 mm de diâmetro, injetou-se o líquido de lavagem para baixo na seção convergente e (4) com o objetivo de se obter uma distribuição radialmente uniforme da água, usou-se 12 orifícios de 4,8 mm para injetar água para baixo na entrada da seção convergente. Para medir a queda de pressão no Venturi, um manômetro foi utilizado. As amostras de aerossol foram coletadas isocineticamente através de sondas de 7,5 mm de diâmetro interno. As amostras de aerossol foram contadas e medidas em 23 intervalos de tamanhos cobrindo uma faixa de diâmetro de 0,32 a 2,8  $\mu\text{m}$ . Os resultados foram comparados com os modelos de YUNG *et al.* (*apud* RUDNICK, 1986), CALVERT *et al.* e BOLL. Todos os modelos apresentaram bons resultados com o aumento o tamanho da garganta. O modelo de CALVERT deve ser usado com cautela pois suas previsões dependem muito do parâmetro  $f$  escolhido. Já o modelo de YUNG foi o que apresentou melhores resultados dos modelos testados, enquanto do modelo de BOLL não obtiveram bons resultados nos seus experimentos.

Os resultados experimentais e a deposição de aerossol de um lavador Venturi com operação do tipo *self-priming* foram avaliados por MAYINGER e LEHNER (1995). Ao contrário das injeções de líquido usuais, nas quais o líquido é bombeado para dentro do Venturi, a operação *self-priming* ocorre pela diferença de pressão entre o exterior e o interior da garganta do Venturi surgida da pressão hidroestática do líquido e pela pressão estática do fluxo de gás. A água vinha de um tanque posicionado em um nível superior ao lavador Venturi e a pressão hidroestática era variada por diferentes quantidades de água dentro do tanque. O líquido era injetado através de vários orifícios ao longo da garganta do Venturi, situados perpendicularmente ao fluxo de gás. A garganta do lavador era retangular com o intuito de se obter uma distribuição uniforme do líquido de lavagem ao longo de toda seção. Finas partículas de dióxido de titânio eram injetadas no fluxo de gás. Essas partículas foram escolhidas em função de seus pequenos diâmetros de 0,1 a 1,4  $\mu\text{m}$  sendo o diâmetro médio 0,8  $\mu\text{m}$ . Para medir a distribuição de partículas e avaliar a eficiência fracionária de separação utilizou-se um empactador de baixa pressão, no qual um fluxo isocinético foi aspirado por meio de um equipamento de amostragem. Com a conclusão deste trabalho notou-se que lavadores Venturi operando no modo *self-priming* eram ideais para separação de partículas finas e que a eficiência de coleta aumentava com altas cargas de líquido, o que pôde ser alcançado com altas diferenças de pressão. Observou-se também com este trabalho que um aumento no número de injeções de líquido de lavagem só era vantajoso quando existia uma recarga de líquido por nível, já que a eficiência de separação era sensível à quantidade de líquido. E finalmente, mostrou-se que um lavador operando no modo *self-priming* a carga de líquido aumentava com a diminuição da velocidade do gás.



Lavadores Venturi operando na remoção de partículas inaláveis foram estudados experimentalmente neste trabalho de OLIVEIRA e COURY (1996). Os equipamentos usados aqui foram projetados para um diâmetro de corte aerodinâmico de  $1,0 \mu\text{m}$ . Partículas de diâmetros de  $0,75$ ,  $2,0$ ,  $4,0$ ,  $7,5$  e  $15,0 \mu\text{m}$  e comprimentos de garganta de  $0,023$ ,  $0,063$  e  $0,096 \text{ m}$  foram avaliados variando-se a vazão de líquido de  $5 \times 10^{-6}$  a  $55 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . A vazão de gás era mantida constante em  $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os resultados mostraram que partículas maiores que  $4,0 \mu\text{m}$  eram praticamente todas removidas. Isto já era esperado já que o Venturi foi projetado para um diâmetro de corte aerodinâmico de partícula de  $1,0 \mu\text{m}$ . Já as partículas de  $2,0 \mu\text{m}$  relataram-se valores de eficiência de coleta de 70 a quase 100% com o aumento da vazão de líquido. Um comportamento diferente foi apresentado pelas partículas de  $0,75 \mu\text{m}$ : a medida que a vazão de líquido aumentou a eficiência decresceu de 70% de coleta até atingir um valor mínimo em torno de 35% e depois, voltou a aumentar. Este comportamento levou à conclusão de que para a remoção de partículas submicrômicas, a eficiência do lavador Venturi era função da vazão do líquido de lavagem.

PULLEY (1997) modelou o desempenho de lavadores de gases Venturi. A performance de lavadores Venturi é expressa em termos de queda de pressão e de eficiência de coleta de partículas. O modelo de AZZOPARDI *et al* (1991) (*apud* PULLEY, 1997) que incorpora fenômenos de fluxo líquido-gás foi ampliado neste trabalho para incluir a predição de remoção de partículas baseada na coleta inercial. Para isso utilizou-se Venturis do tipo *wetted approach* de RUDNICK *et al.* (1986) e Venturis com injeção na garganta de YUNG *et al.* (1984) (*apud* PULLEY, 1997). Em toda a parte experimental ar foi usado como gás e água foi o líquido de lavagem. Os resultados mostraram que o modelo de AZZOPARDI *et al.* apresentou boa concordância para a queda de pressão nos Venturis para os dois tipos de injeção de líquido trabalhados. Extendendo-se esse modelo para incluir a coleta de partículas no lavador Venturi, baseado somente no mecanismo inercial, mostrou-se um significativo aumento na predição da remoção de partículas.

ANANTHANARAYANAN e VISWANATHAN (1999) utilizaram um modelo bidimensional simplificado para prever a distribuição do fluxo de líquido e da eficiência de coleta em um lavador Venturi de seção circular. Este modelo levava em conta: (a) o comprimento da penetração do jato, (b) má distribuição das gotas de líquido, (c) momento inicial do líquido, (d) movimento da gota na direção axial por convecção e na direção radial exclusivamente pela difusão convectiva, (e) distribuição não uniforme do pó na entrada, (f) movimento do pó na direção axial devido a um mecanismo de convectivo e na direção radial em função de um mecanismo de difusão convectiva e (g) coleta do material particulado pelo mecanismo de impactação inercial. Os resultados mostraram que na região de razão líquido-gás alta, a turbulência causada pela interação entre os jatos pôde ser contabilizada usando-se um número de Peclet pequeno. O modelo previu baixas grades de eficiência para todos os tamanhos de partículas (que variavam de  $0,2$  a  $1,6 \mu\text{m}$ ),

com o desvio aumentando com a diminuição do tamanho da partícula. E, finalmente, conclui-se que para se obter uma ótima utilização do líquido e altas eficiências de coleta em lavadores cilíndricos, o número Venturi obtido foi de  $1,5 \times 10^{-3}$ , que é a mesma faixa para unidades de lavadores retangulares. O número Venturi ( $V_N$ ) é uma combinação adimensional dos efeitos da velocidade do gás na garganta, vazão volumétrica líquido-gás, diâmetro e número de orifícios de injeção e da razão da garganta (que é a razão entre a profundidade e a largura da garganta).

Um lavador Venturi convencional, operando verticalmente e usado como sistema de controle da poluição do ar foi escolhido por AGRANOVSKI e WHITCOMBE (2000) para este estudo. Este lavador era utilizado para remover partículas de 0,1 a 1,0  $\mu\text{m}$  com velocidade do gás de 19,0 m/s e apresentava dificuldades na remoção da fração de partículas submicrômicas relatando eficiências de 79%, valor abaixo do esperado. Examinando-se o equipamento observou-se que o sistema de irrigação havia sido mal projetado e por isso, as baixas eficiências. A água era injetada 1 m acima da garganta e o orifício de injeção era largo, o que reduzia a atomização do líquido. Este arranjo do sistema de injeção levava à formação de um filme líquido nas paredes do Venturi, evitando que este líquido tivesse contato com o fluxo de gás contaminado. Sendo assim, para melhorar a performance do lavador, o ponto de injeção foi colocado perto da garganta, estendendo-se o tubo de injeção de líquido para mais um metro dentro do lavador. Isto permitiu que o jato líquido penetrasse diretamente na região de maior velocidade do gás dentro do Venturi. Os resultados dessa modificação mostraram que houve um aumento de 13% na coleta das partículas. Esse aumento de 79 para 92% na eficiência de coleta levou a um pequeno aumento na queda de pressão do sistema.

Através de uma técnica de difração a laser ALONSO *et al.* (2001) estudaram o tamanho das gotas formadas no interior de um lavador Venturi cilíndrico. A injeção de líquido foi feita de duas formas, sendo elas jato na garganta e filme na direção contrária à seção convergente. Na injeção na forma de jato foram realizadas duas ao longo da garganta do Venturi e uma no final da seção divergente. As condições operacionais trabalhadas aqui foram de 50 a 90 m/s de velocidade do gás e 0,5 a 2,01  $L/m^3$  de razão volumétrica líquido-gás. Então, a análise dos dados experimentais mostrou que o tamanho das gotas sofreu mais efeito da velocidade do gás do que a razão volumétrica líquido-gás. Foi possível concluir também que o tamanho das gotas variava ao longo do Venturi, especialmente na garganta e que não houve grande diferença de medidas deste tamanho entre as injeções na forma de jato e de filme.

Considerando-se a importância da dinâmica do jato, especialmente a penetração do jato, na eficiência de coleta em lavadores Venturi, GONÇALVES *et al.* (2002) apresentaram uma descrição matemática da trajetória, da quebra e da penetração do jato em um

lavador retangular. A injeção de líquido era feita na garganta do Venturi através de um único orifício. Os valores das variáveis velocidade do jato e velocidade do gás na garganta usados no procedimento experimental eram respectivamente de 6,07 a 15,9 m/s e 58,3 a 74,9 m/s. Sendo assim, notou-se que o jato líquido perdia massa continuamente, ou seja, ele atomizava gradualmente. Viu-se que o ponto de atomização não era único e que a atomização iniciava-se após uma certa distância do orifício de injeção do líquido.

A distribuição das gotas tem importância significativa na performance de lavadores Venturi, uma vez que assegurando-se uma boa distribuição do líquido pode-se garantir o aumento da eficiência de coleta com um uso mínimo de líquido. Por isso, GONÇALVES *et al.* (2004) examinaram teórica e experimentalmente a distribuição das gotas num lavador Venturi retangular operando horizontalmente. O líquido era injetado através de um único orifício de 1,0 mm de diâmetro a uma distância de 31,5 mm depois do início da garganta e as velocidades de gás e vazões de líquido usadas foram de 58,3 a 74,6 m/s e 286, 559 e 853 mL/min, respectivamente. Uma sonda com 2,7 mm de diâmetro interno foi usada para remover líquido isocineticamente de vários pontos dentro do equipamento, tanto que foi possível estudar a distribuição de líquido próxima ao ponto de injeção. Dessa forma, os autores observaram que existiam regiões de alta e baixa concentração de líquido na garganta de um lavador Venturi Peasy-Anthony e que variáveis como velocidades do gás e do jato influenciavam na cobertura de líquido na garganta do Venturi. A distribuição das gotas predita pelo modelo proposto representou bem os dados experimentais.

MARTINS COSTA *et al.* (2005) trabalharam com um lavador Venturi de seção retangular que operava horizontalmente. O líquido de lavagem era introduzido na garganta por meio de um único orifício de 1,0 mm de diâmetro. O material particulado utilizado foi uma rocha mineral de diâmetro médio de 5,8  $\mu\text{m}$ . Os dois pontos de amostras isocinéticas localizavam-se antes do lavador e após o ciclone. As conclusões obtidas foram que a eficiência de coleta aumentava com o aumento da vazão de líquido até certo ponto, quando a penetração excessiva do jato pôde ter sido responsável por uma rápida formação de um filme líquido, diminuindo consideravelmente a quantidade de líquido presente na forma de gotas. E as curvas da grade de eficiência exibiram um valor mínimo para partículas de 0,3  $\mu\text{m}$  de diâmetro, indicando que dois mecanismos podem ter atuado: um para grandes partículas e outro para partículas menores.

Ainda em 2005, RIBEIRO testou lavadores Venturi de seção retangular com injeção de líquido de 1 a 5 orifícios de 1 mm de diâmetro distribuídos na garganta dos lavadores. Foram utilizados dois planejamentos experimentais para a realização dos ensaios experimentais. O primeiro estudou a influência da vazão de líquido na faixa de 300 a 900  $\text{cm}^3/\text{min}$ , do comprimento da garganta de 6,5 a 18,5 cm e de números de orifícios de 1 a 5. A velocidade do gás era mantida constante a 69,33 m/s. O segundo planejamento utilizou

apenas 1 orifício de injeção de líquido, enquanto variou-se a velocidade do gás de 58,66 a 69,33 m/s. Os resultados do primeiro planejamento, relataram eficiências de coleta de 50 a 91%, mostraram tendência de aumento da remoção de partículas com aumento da vazão de líquido e do comprimento da garganta e que o lavador Venturi apresentou melhor desempenho quando utilizou-se apenas 1 orifício de injeção de líquido de lavagem. Já para o segundo planejamento, os percentuais de remoção de partículas ficaram entre 52 e 93%. Nesse caso, notou-se que um aumento na velocidade do gás na garganta do Venturi, resultava em um aumento da eficiência de coleta. Após testar os modelos de predição de JOHNSTONE *et al.* (1954), de CALVERT *et al.* (1972) e de LEITH e COOPER (1980) e observar que os dois primeiros subestimaram os valores de eficiência obtidos experimentalmente, enquanto o último, superestimou, RIBEIRO viu a necessidade de ajustar um modelo aos seus pontos experimentais. Então, como em testes anteriores, a variável comprimento da garganta tinha sido relevante na eficiência de coleta, decidiu-se ajustar uma equação do fator empírico  $f$ , usado no modelo de CALVERT *et al.* (1972), como função do comprimento da garganta ( $f = 0,5161.L_g^{0,3005}$ ). A boa concordância dos valores experimentais de eficiência com os valores estimados pelo modelo de CALVERT modificado validou o ajuste.

Na sua unidade experimental, MEILI (2006) trabalhou com seis lavadores Venturis de seção circular, sendo três com diâmetro de garganta de 23 mm e os outros três, com 33 mm. A injeção de líquido era feita através de um único orifício de 1 mm de diâmetro localizado no início da garganta. Em cada um dos lavadores, MEILI testou comprimentos de garganta de 66, 99 e 132 mm, velocidade de gás de 4, 7 e 10 m/s e vazões de líquido de 180, 360 e 540 mL/min. Os lavadores Venturi de maior diâmetro de garganta removeram o pó de rocha fosfática do sistema com eficiência de 11 a 89%, enquanto os lavadores de menor diâmetro de garganta, produziram eficiências de coleta de 20 a 100%. Seus resultados mostraram uma tendência de aumento na remoção das partículas com o aumento da velocidade do gás e da vazão de líquido e ele verificou também que a diminuição no diâmetro da garganta refletia em maiores eficiências de coleta. A comparação da predição dos modelos teóricos de eficiência de coleta com os valores de eficiência obtidos experimentalmente relatou que, enquanto os modelos de JOHNSTONE *et al.* e de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) subestimaram os valores experimentais, o modelo de CALVERT (1972) superestimou os resultados de eficiência em baixa velocidades e subestimou em altas.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## Materiais e Métodos

### 3.1 Material Particulado

O material particulado escolhido para ser disperso na corrente gasosa foi pó de rocha fosfática, fornecido pela empresa Fosfértil - Fertilizantes Fosfatados S. A. de Patos de Minas (MG). A densidade do material foi medida por MEILI (2006) através da técnica de picnometria à quente e o valor resultante foi de  $3,04 \text{ g/cm}^3$ .

Originalmente, o material tinha diâmetro médio de  $59,90 \mu\text{m}$ . A análise granulométrica foi feita no equipamento Malvern Mastersizer, cujo método é por difração a laser. O material era levado a estufa por um período de 24 horas antes de ser moído em um moinho de bolas de porcelana durante tempo suficiente para atingir o tamanho desejado. Neste trabalho foram usados dois diâmetros distintos do material:  $2,21$  e  $9,06 \mu\text{m}$ . O tempo de permanência no moinho variava de acordo com o tamanho da partícula que seria trabalhada. Esta etapa do projeto demorou aproximadamente 3 meses, porque o moinho não operava de forma representativa, já que ele demorava cerca de 20 horas para atingir um diâmetro de  $12,0 \mu\text{m}$  e em questão de duas a cinco horas de moagem o tamanho do material diminuía para cerca de  $2,0 \mu\text{m}$ . E foi por este motivo que não foi possível trabalhar com tamanhos de partículas igualmente espaçados entre  $2,21$  e  $9,06 \mu\text{m}$ .

Quando o material particulado atingia o tamanho desejado, ele era mantido na estufa e só era retirado direto para sua utilização nos experimentos para garantir que as partículas

fossem alimentadas com o mínimo de umidade possível, evitando, assim, a aglomeração do pó no interior da tubulação.

O menor diâmetro médio de Sauter da rocha fosfática foi de 2,21  $\mu\text{m}$  e a distribuição de tamanho é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Distribuição de tamanho da rocha fosfática para um diâmetro médio de Sauter de  $D_{[3,2]} = 2,21 \mu\text{m}$ .

Faixa de diâmetros [ $\mu\text{m}$ ]	Diâmetro médio [ $\mu\text{m}$ ]	% em volume
0,05 - 0,36	0,205	1,11
0,36 - 0,67	0,515	6,62
0,67 - 1,24	0,955	12,34
1,24 - 2,28	1,760	12,72
2,28 - 4,19	3,235	7,59
4,19 - 7,72	5,955	12,82
7,72 - 14,22	10,970	14,12
14,22 - 26,20	20,210	13,87
26,20 - 41,43	33,815	10,6
41,43 - 76,32	58,875	7,73

O Malven Martersizer indicou para a maior granulometria um diâmetro médio de Sauter de 9,06  $\mu\text{m}$ . A Tabela 3.2 mostra a distribuição de tamanho do material.

Tabela 3.2: Distribuição de tamanho da rocha fosfática para um diâmetro médio de Sauter de  $D_{[3,2]} = 9,06 \mu\text{m}$ .

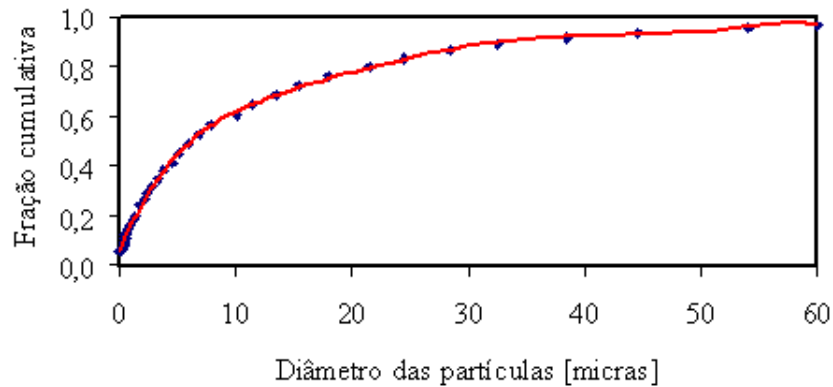
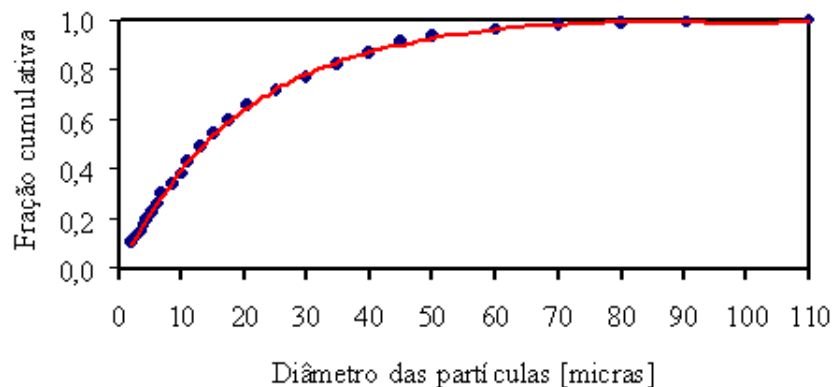
Faixa de diâmetros [ $\mu\text{m}$ ]	Diâmetro médio [ $\mu\text{m}$ ]	% em volume
0,05 - 3,09	1,570	3,73
3,09 - 4,19	3,640	8,65
4,19 - 5,69	4,940	12,66
5,69 - 7,72	6,705	9,53
7,72 - 9,00	8,360	4,47
9,00 - 12,21	10,605	9,14
12,21 - 19,31	15,760	12,83
19,31 - 30,53	24,920	14,45
30,53 - 56,23	43,380	18,25
56,23 - 120,67	88,450	6,24

Os dados da análise granulométrica dos dois tamanhos de partículas foram ajustados de acordo com a equação do modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) (Equação (3.1)). Os valores dos parâmetros e do coeficiente de correlação encontram-se na Tabela (3.3) e as curvas de ajuste do modelo RRB, nas Figuras 3.1 e 3.2.

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{D}{d_{50}}\right)^n\right) \quad (3.1)$$

Tabela 3.3: Valores dos parâmetros  $d_{50}$  e  $n$  do modelo RRB e do coeficiente de correlação.

$D_{3,2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$n$	$R^2$
2,21	11,55	0,72	98,77
9,06	20,95	1,04	98,43

Figura 3.1: Distribuição granulométrica cumulativa para material 2,21  $\mu\text{m}$ .Figura 3.2: Distribuição granulométrica cumulativa para material 9,06  $\mu\text{m}$ .

## 3.2 O Líquido de Lavagem e a Injeção do Líquido

O líquido utilizado na limpeza do pó de rocha fosfática da corrente de gás foi a água à temperatura ambiente.

O líquido de lavagem era injetado através de um orifício de 1 mm de diâmetro no início da garganta do lavador acoplado diretamente na parede do equipamento, o que resultou em uma injeção na forma de jato.

### 3.3 Sistema de Alimentação do Pó

A alimentação do material particulado ao lavador Venturi foi realizada com o uso de um gerador de pó do tipo prato giratório mostrado na Figura 3.3. Este prato de aço inoxidável continha um sulco semi-circular [1] onde a rocha fosfática era depositada. Ainda sobre o prato giratório existia um sistema de compactação do material particulado no sulco constituído por um raspador de borracha [2]. O pó era aspirado do sulco através de um tubo Venturi [3] por meio da passagem de ar comprimido a alta velocidade.

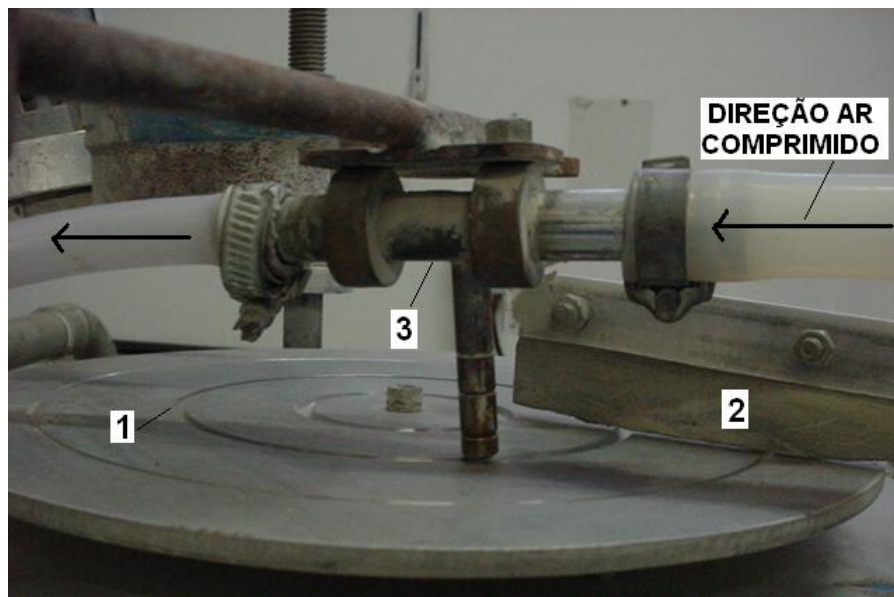


Figura 3.3: Alimentador de pó do tipo prato giratório.

Alimentação da rocha fosfática era calibrada antes do início de cada experimento e repetida até que a alimentação não estivesse sofrendo variações. Um filtro de polipropileno era pesado e o material era injetado nele por um período de 3 minutos. Em seguida, o filtro era novamente pesado e repetia-se o procedimento até que houvesse reprodução da quantidade de pó injetada no filtro.

### 3.4 Os Lavadores Venturi

O sistema experimental usado neste trabalho apresentava um lavador Venturi de seção circular operando horizontalmente. O Venturi era de acrílico o que permitiu observar claramente a formação da névoa de gotas. Os dois lavadores estudados tinham os mesmos comprimentos e ângulos das seções convergentes e divergentes e o mesmo diâmetro de garganta de 23 mm, sendo a única diferença entre eles o comprimento da garganta (Tabela 3.4). O menor comprimento era de 99 mm e o maior de 132 mm.



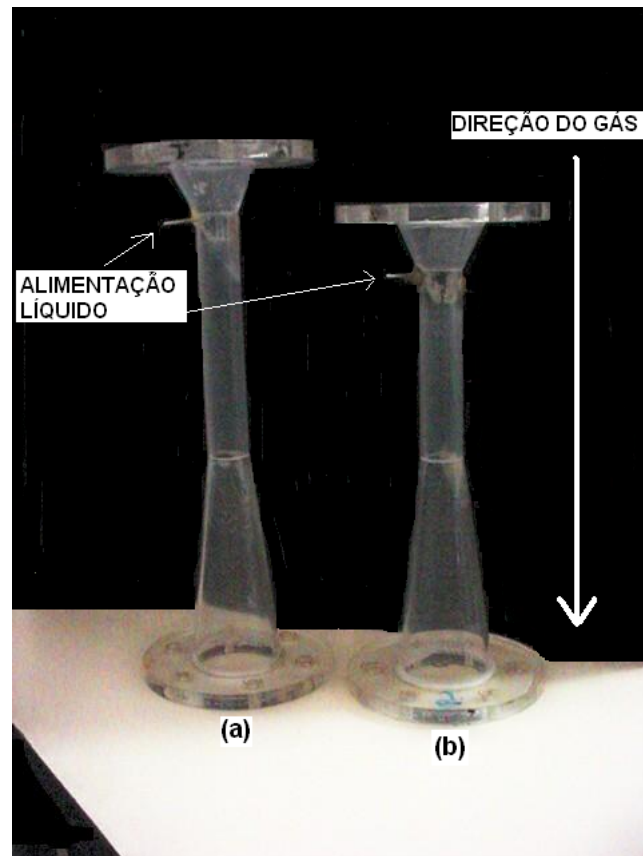


Figura 3.4: Lavadores Venturi de 132 mm (a) e de 99 mm (b).

Tabela 3.4: Dimensões dos lavadores Venturi.

Lavador Venturi	Comprimento da seção convergente [mm]	Comprimento da garganta [mm]	Comprimento da seção divergente [mm]	Diâmetro da garganta [mm]
1	34	129	99	23
2	34	129	132	23

### 3.5 O Ciclone

No final na unidade experimental, existia um separador ciclônico. No *overflow* do equipamento era descartado para a atmosfera o material particulado não coletado pelo lavador Venturi. Já, para cada condição operacional trabalhada, eram recolhidas três amostras do pó de rocha fosfática removido do fluxo gasoso pelo lavador, juntamente com a água. As dimensões do ciclone utilizado estão apresentadas na Figura 3.5.

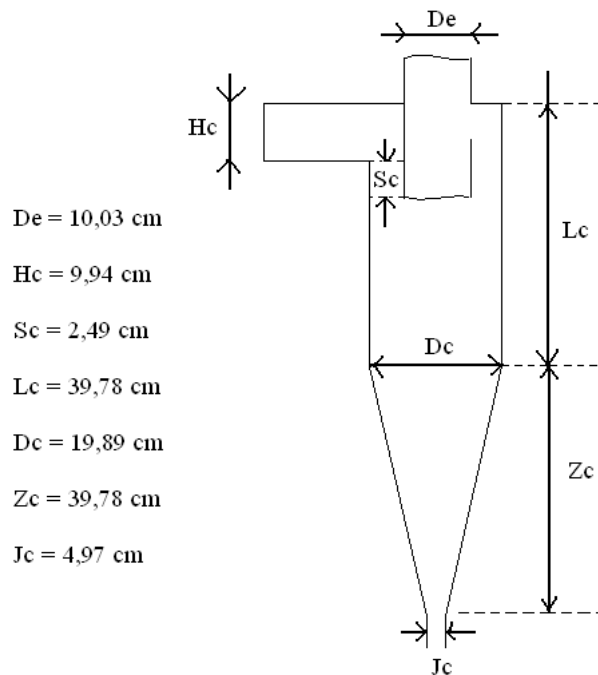


Figura 3.5: Esquema do separador ciclônico.

## 3.6 Procedimento Experimental

Para a realização dos ensaios, um sistema experimental como o apresentado na Figura 3.6 foi utilizado. Ele era constituído pelos seguintes dispositivos:

1. Soprador do tipo Kepler Webber R16Y de 7,5 cv;
2. Válvula para ajuste da vazão de ar;
3. Alimentador do tipo prato giratório;
4. Lavador Venturi;
5. Bomba peristáltica;
6. Ciclone.

O soprador gerava uma corrente de gás limpo no interior da tubulação de 2" de diâmetro. A vazão do gás era medida com um anemômetro e ajustada, através de uma válvula, de acordo com a velocidade que se desejava no interior da garganta do Venturi. Mais à frente na tubulação, as partículas eram dispersas na corrente de gás por meio do alimentador de pó do tipo prato giratório. A bomba peristáltica, previamente calibrada, alimentava constantemente água no lavador Venturi. Sendo assim, após a limpeza do gás,

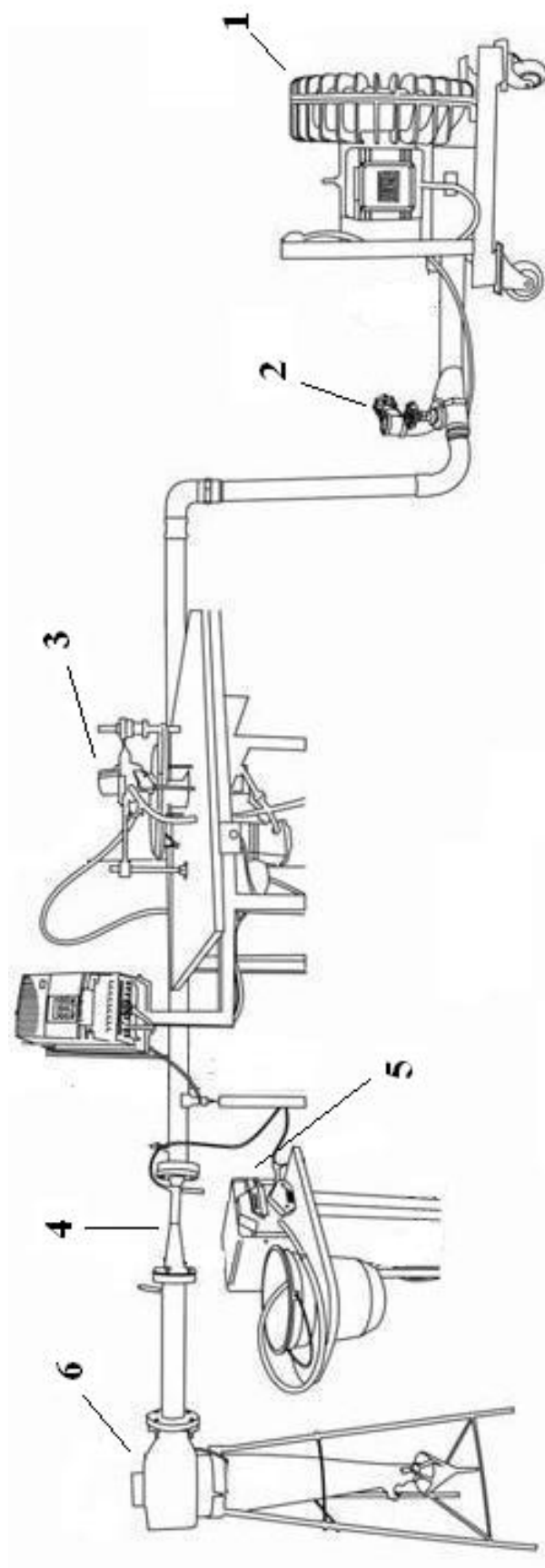


Figura 3.6: Esquema da unidade experimental.

a lama gerada era recolhida no *underflow* do ciclone, enquanto o ar com as partículas não coletadas saía no *overflow* do ciclone.

A lama era recolhida em recipientes inicialmente pesados durante um período de tempo que variava de acordo com as vazões de líquido e de gás trabalhadas. Os recipientes eram encaminhados à estufa e após a secagem da água, eram novamente pesados para se determinar a massa de material particulado coletada. A eficiência global era calculada a partir da seguinte fórmula:

$$\eta_{global} = \frac{m_{coletada}}{m_{alimentada}} \quad (3.2)$$

Sendo  $m_{coletada}$  a massa de pó recolhida no *underflow* do ciclone e  $m_{alimentada}$  a massa de pó injetada na tubulação pelo alimentador de pó.

### 3.7 Planejamento de Experimentos

A Tabela 3.5 apresenta os fatores que foram estudados e seus respectivos níveis no planejamento. A escolha das velocidades de gás trabalhadas dependeu não só da faixa usual de operação dos lavadores Venturi (de 50 a 120 m/s) como também da capacidade do soprador usado nos experimentos. Já em relação às vazões de líquido, como a bomba peristáltica tinha capacidade máxima de alimentação de 580 mL/min, optou-se por trabalhar com vazões de 340 e 500 mL/min, intermediárias àquelas estudadas anteriormente por MEILI (2006).

Tabela 3.5: Variáveis e níveis do planejamento.

Variáveis	Nível -1	Nível 1
Velocidade do gás na garganta [m/s]	55,2	76,8
Vazão de líquido [mL/min]	340	500
Comprimento da garganta [mm]	99	132
Diâmetro do pó [ $\mu\text{m}$ ]	2,21	9,06

Um planejamento experimental fatorial completo do tipo 2<sup>4</sup> foi realizado com o objetivo de se determinar as variáveis que apresentavam efeito sobre a eficiência de coleta de um conjunto de limpeza de gás utilizando um lavador Venturi. A Tabela 3.6 mostra a matriz do planejamento experimental.

Tabela 3.6: Matriz do planejamento experimental  $2^4$ .

Exp.	Velocidade do Gás [m/s]	Vazão de Líquido [mL/min]	Comprimento da Garganta [mm]	Diâmetro da Partícula [ $\mu\text{m}$ ]
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

### 3.8 Modelos Teóricos para Determinação da Eficiência Global

Os modelos teóricos para se calcular a eficiência global de coleta escolhidos para a comparação com os valores experimentais foram o modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954), o modelo de CALVERT *et al.* (1972) e o modelo de CALVERT modificado (Ribeiro, 2005).

O modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954) é o mais antigo e como já foi relatado anteriormente, é simples e considera o diâmetro da partícula como parâmetro da equação. O valor do parâmetro de impactação inercial usado para os cálculos foi de 20, que é a média da faixa recomendada ( $13 \leq \psi \leq 27$ ). O modelo de CALVERT *et al.* (1972) (*apud* MARTINS COSTA, 2002), por sua vez, é bastante aplicado em lavadores de gases do tipo Venturi e para seu parâmetro  $f$  utilizou-se o valor de 0,45. E, finalmente, o modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) foi interessante nesta comparação em função da variável comprimento da garganta que aparece em sua equação e já que foi também, um dos fatores avaliados neste estudo.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## Resultados e Discussões

### 4.1 Análise Estatística dos Resultados Experimentais

A Tabela 4.1 apresenta os resultados experimentais para a eficiência de coleta nos lavadores.

Na Tabela 4.1, observa-se que o aumento do nível na variável velocidade do gás, do experimento 3 para o 4, resultou numa queda da eficiência de coleta de partículas de 60,8 para 59,2 m/s. Este comportamento da resposta eficiência de coleta com aumento na velocidade do gás, não foi verificado para os outros experimentos.

O *software* Statistica 7.0 foi usado para a realização da análise estatística dos resultados a fim de determinar quais variáveis estudadas influenciavam na resposta eficiência de coleta de partículas ( $Y$ ). As variáveis ( $X_1$ ), ( $X_2$ ), ( $X_3$ ) e ( $X_4$ ) correspondem à velocidade do gás, vazão de líquido, comprimento da garganta e diâmetro do pó nas formas codificadas. Diante de uma correlação quadrática de 87,8% verificou-se que ( $X_1$ ), ( $X_2$ ), ( $X_3$ ), ( $X_4$ ), ( $X_1X_2$ ) e ( $X_1X_3$ ) apresentaram efeito na eficiência global de coleta. A Tabela 4.2 mostra os efeitos das variáveis significativas na resposta e os valores dos coeficientes do modelo estatístico.

A Figura 4.1 apresenta o gráfico de pareto através do qual é possível confirmar a influência das variáveis analisadas. Pode-se observar que a variável que afetou mais a

Tabela 4.1: Resultados da matriz do planejamento experimental  $2^4$ .

Exp.	Velocidade do Gás [m/s]	Vazão de Líquido [mL/min]	Comprimento da Garganta [mm]	Diâmetro da Partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Eficiência de Coleta [%]	Desvio Padrão
1	-1	-1	-1	-1	53,8	0,0733
2	1	-1	-1	-1	64,2	0,1453
3	-1	1	-1	-1	60,8	0,2350
4	1	1	-1	-1	59,2	0,0363
5	-1	-1	1	-1	55,0	0,0915
6	1	-1	1	-1	75,3	0,0493
7	-1	1	1	-1	83,5	0,0410
8	1	1	1	-1	86,8	0,1975
9	-1	-1	-1	1	53,4	0,0806
10	1	-1	-1	1	66,4	0,1215
11	-1	1	-1	1	73,6	0,0545
12	1	1	-1	1	74,9	0,0618
13	-1	-1	1	1	66,4	0,0029
14	1	-1	1	1	94,8	0,0491
15	-1	1	1	1	73,5	0,0498
16	1	1	1	1	96,5	0,01349

Tabela 4.2: Resultado da análise estatística do planejamento.

	Efeitos	Desvio padrão	Nível significância	Parâmetros	Desvio padrão coeficientes
Média	71,13	1,56	0,000	71,13	1,56
$X_1$	12,26	3,11	0,003	6,13	1,56
$X_2$	9,94	3,11	0,011	4,97	1,56
$X_3$	15,69	3,11	0,001	7,84	1,56
$X_4$	7,61	3,11	0,037	3,81	1,56
$X_1X_2$	-5,76	3,11	0,097	-2,88	1,56
$X_1X_3$	6,49	3,11	0,067	3,24	1,56

eficiência foi o comprimento da garganta, seguido pela velocidade do gás, vazão de líquido, diâmetro da partícula, interação entre velocidade do gás e comprimento da garganta e, finalmente, a interação entre velocidade do gás e vazão de líquido.

O método de regressão múltipla permitiu a determinação do modelo estatístico para a eficiência com um nível de significância inferior a 10%.

$$\eta = 71,13 + 6,13X_1 + 4,97X_2 + 7,84X_3 + 3,81X_4 - 2,88X_1X_2 + 3,24X_1X_3 \quad (4.1)$$

A Figura 4.2 não mostra nenhuma tendência entre os valores observados e os preditos, já que os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno da reta, ou seja, o modelo

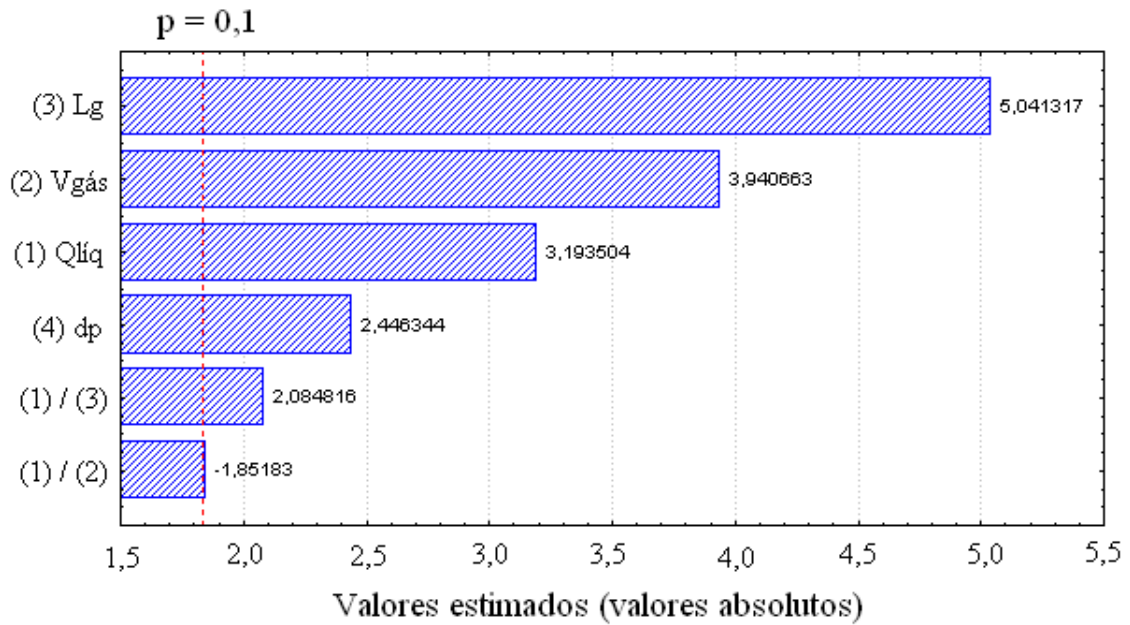


Figura 4.1: Gráfico de pareto.

ajustou os resultados experimentais. A boa concordância destes valores validou a análise estatística do planejamento.

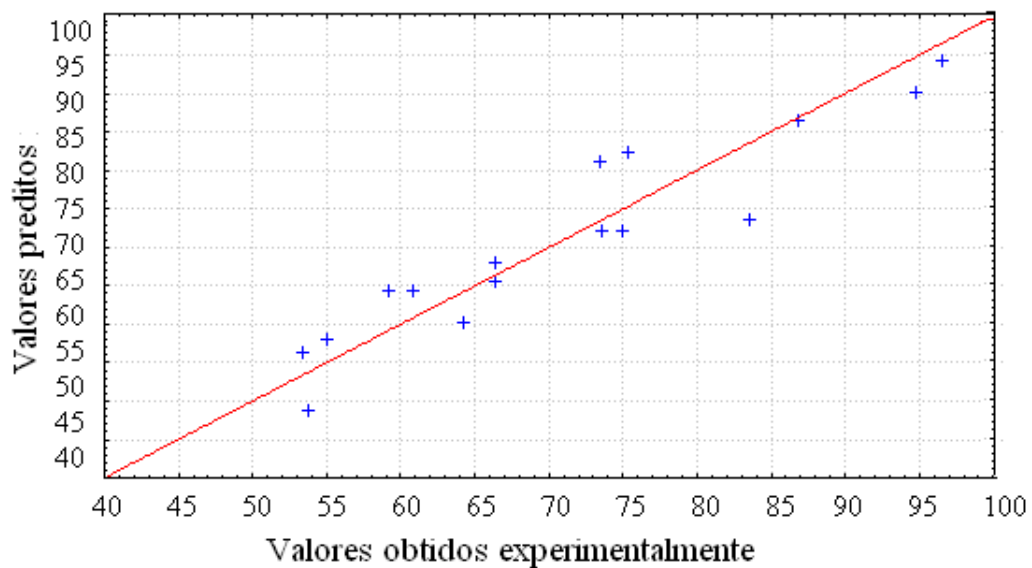


Figura 4.2: Valores observados experimentalmente pelo valores preditos.

No gráfico de distribuição de resíduos, o comportamento dos resíduos em torno do eixo  $y = 0$  mostra a aleatoriedade dos mesmos.

A forma como alterações nas variáveis estudadas influenciou na resposta eficiência de coleta pode ser analisada nos gráficos de superfície de resposta. A Figura 4.4 mostra que quando os experimentos foram realizados com os valores mais altos da velocidade do gás e do comprimento da garganta, a remoção do pó apresentou maior percentual de remoção.



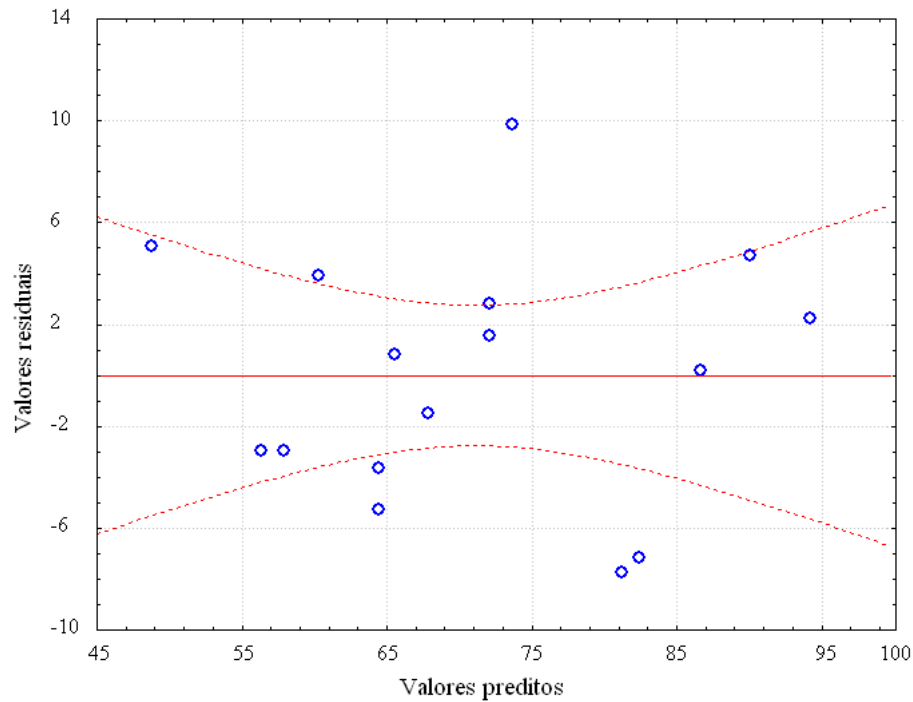


Figura 4.3: Distribuição de resíduos.

Em termos de valores, como foi apresentado na Tabela 4.1, a maior eficiência de coleta de partículas foi de 96,5% quando a vazão de líquido era de 500 mL/min e o diâmetro do pó de 9,06  $\mu\text{m}$ .

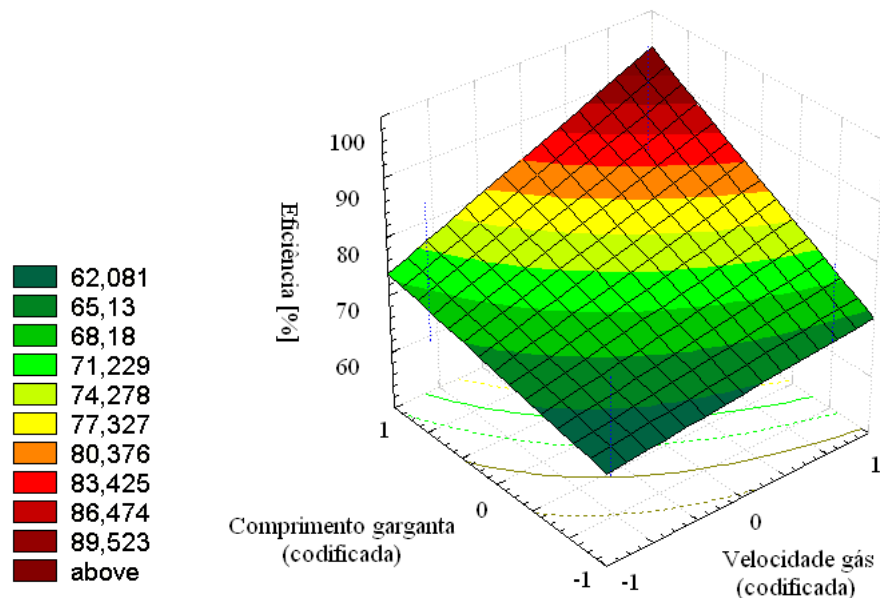


Figura 4.4: Superfície de resposta para a velocidade do gás e o comprimento da garganta.

Este mesmo comportamento da resposta eficiência global de coleta pode ser vista na Figura 4.5, que mostra o efeito das variáveis velocidade do gás e vazão de líquido. O modo como cada uma das variáveis analisadas estatisticamente afetam na remoção das

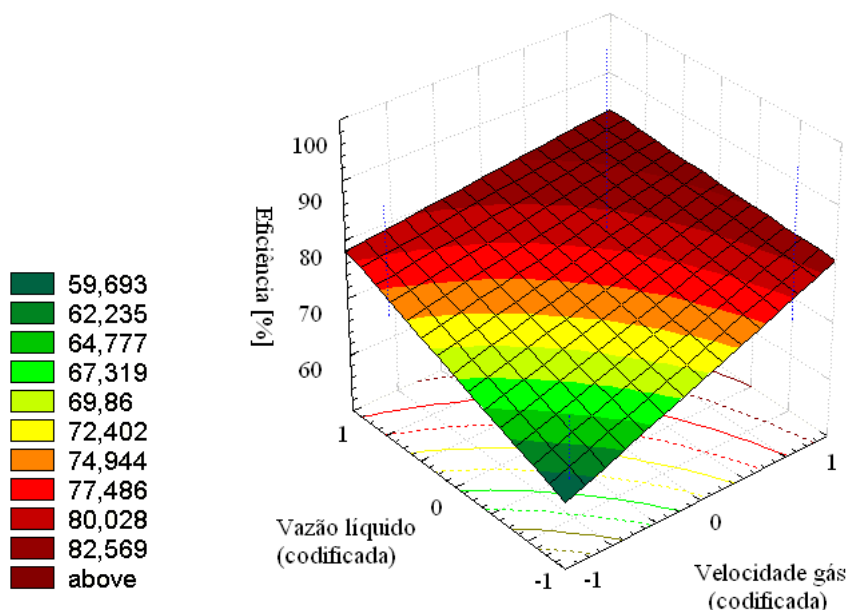


Figura 4.5: Superfície de resposta para a velocidade do gás e a vazão de líquido.

partículas é explicado mais detalhadamente no tópicos a seguir.

## 4.2 Curva Característica dos Lavadores Venturi

A fim de se mensurar o comportamento fluidodinâmico dos tubos Venturi para o escoamento principal (ar), a curva característica (queda de pressão em função do número de Reynolds) foi estimada por simulações em CFD e, posteriormente, determinada por dados experimentais. Nestes moldes, a Figura 4.6 apresenta a curva característica do tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm.

De acordo com as informações da Figura 4.6, verificou-se que a queda de pressão no tubo Venturi foi diretamente proporcional ao quadrado do regime de escoamento do sistema, comportamento este compatível com os ensinamentos e relatos contidos na literatura sobre mecânica dos fluidos. A fluidodinâmica computacional mostrou-se como uma ferramenta eficaz na predição das curvas características em tubos Venturi, sendo perfeitamente ratificada por dados experimentais levantados nos próprios lavadores.

Vale ressaltar que a curva característica apresentada na Figura 4.6 pode ser também atribuída ao lavador Venturi de 132 mm, haja vista que o incremento de 33 mm em relação ao equipamento de 99 mm, proporciona uma queda de pressão adicional insignificante no sistema (tubo liso) nas mesmas condições operacionais de funcionamento.

Maiores detalhes acerca da metodologia utilizada sobre a determinação da curva ca-

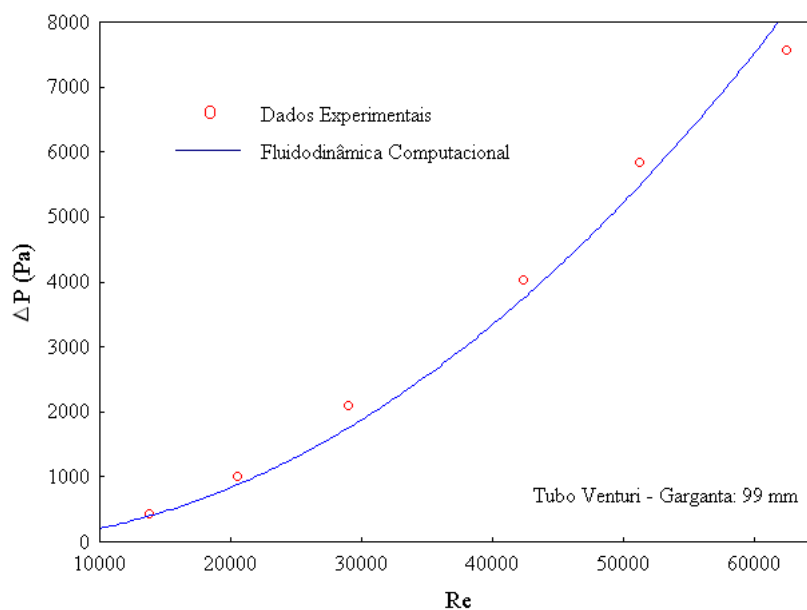


Figura 4.6: Curva característica do lavador Venturi de 99 mm de comprimento de garganta.

racterística pelas vias numéricas e experimentais podem ser encontrados no Apêndice.

### 4.3 Efeito da Penetração do Jato

Na Tabela 4.3 encontram-se os valores calculados para a penetração do jato na garganta do Venturi de acordo com a Equação 2.1.

Tabela 4.3: Penetração ( $l^*$ ) e velocidade do jato ( $V_j$ ) para as condições de velocidade do gás e vazão de líquido.

$Q_L$ [mL/min]	$V_G$ [m/s]	$V_j$ [m/s]	$l^*$ [cm]
340	55,2	7,22	14,9
340	76,8	7,22	10,7
500	55,2	10,61	21,9
500	76,8	10,61	15,8

Nota-se que os maiores valores de penetração do jato foram observados quando se trabalhou com a menor velocidade de gás na garganta do lavador e com a maior vazão de líquido. Para estas condições, a maior eficiência de coleta observada foi de 83,5% quando o comprimento da garganta era de 132 mm e o diâmetro do pó de  $2,21 \mu\text{m}$ . Já para a menor penetração do jato, 94,8% de coleta do material particulado foram obtidos ao se trabalhar com a maior velocidade do gás, a menor vazão de líquido e com comprimento de garganta de 132 mm e partículas de  $9,06 \mu\text{m}$ . É interessante perceber como a menor penetração do jato na garganta resultou em maior coleta de partículas. Como este fato foi observado para

o mesmo comprimento de garganta, verifica-se que o diâmetro da partícula foi decisivo para este fato, já que material com maior diâmetro médio é coletado com mais eficiência que partículas com diâmetro médio menor. Este fenômeno será explicado adiante. É importante ressaltar também que o jato precisa ser bem distribuído no interior do lavador independente de seu comprimento.

A variação da penetração do jato de acordo com velocidade do gás e da vazão de líquido leva a diferentes frações de líquido na forma de filme nas paredes do Venturi, afetando na eficiência de coleta. De acordo com MARTINS COSTA (2002), jatos curtos ou excessivos geram concentrações de gotas que se distribuem próximas às paredes superior ou inferior da garganta, gerando altos valores de fração de filme líquido. A presença do filme líquido é ineficiente para a coleta de partículas porque significa que uma menor quantidade de líquido esteve presente na forma de gotas, que atuariam na coleta do material particulado. VISWANATHAN *et al.* (1983) também identificaram este mesmo problema de penetração excessiva do jato em seu trabalho.

## 4.4 Influência da Velocidade do Gás e do Comprimento da Garganta

As Figuras 4.7 a 4.10 mostram a eficiência de coleta global como função da velocidade do gás na garganta nos dois comprimentos de garganta e os diferentes diâmetros de partículas utilizando-se 340 e 500 mL/min de vazão de líquido.

Vê-se que, um acréscimo na velocidade do gás refletiu em percentuais mais altos de remoção do material. MEILI (2006) estudou os mesmos lavadores Venturi usados neste trabalho e da mesma forma que RIBEIRO (2005), verificou que com um aumento na velocidade do gás ocorre maior turbulência no interior da garganta do Venturi o que leva a geração de maior número de gotas e melhor espalhamento do jato. Estas condições favorecem a eficiência de coleta das partículas. PLACEK e PETERS (1981) também identificaram esse mesmo comportamento da eficiência com a velocidade do gás e descreveram razões para isso. A primeira é que a própria equação de NUKIYAMA e TANASAWA (1938) prevê a quebra do *spray* em muitas gotículas com o aumento da velocidade do gás na garganta. Ainda segundo os autores, tanto a diferença de alta velocidade quanto o pequeno diâmetro das gotas tendem a aumentar o número de Stokes, isso corresponderia a maior eficiência de coleta por impactação. Outra razão é que como mais gotas podem ser formadas (para um dado volume de líquido), a concentração das mesmas é maior, o que afeta diretamente a taxa de coleta.

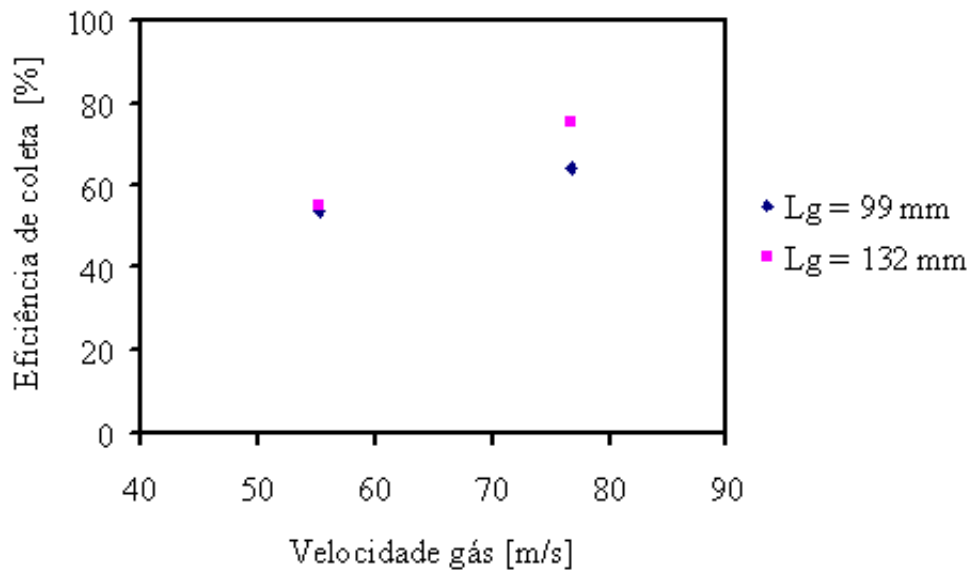


Figura 4.7: Efeito da velocidade do gás na garganta para  $Q_L = 340$  mL/min e  $d_p = 2,21$   $\mu\text{m}$ .

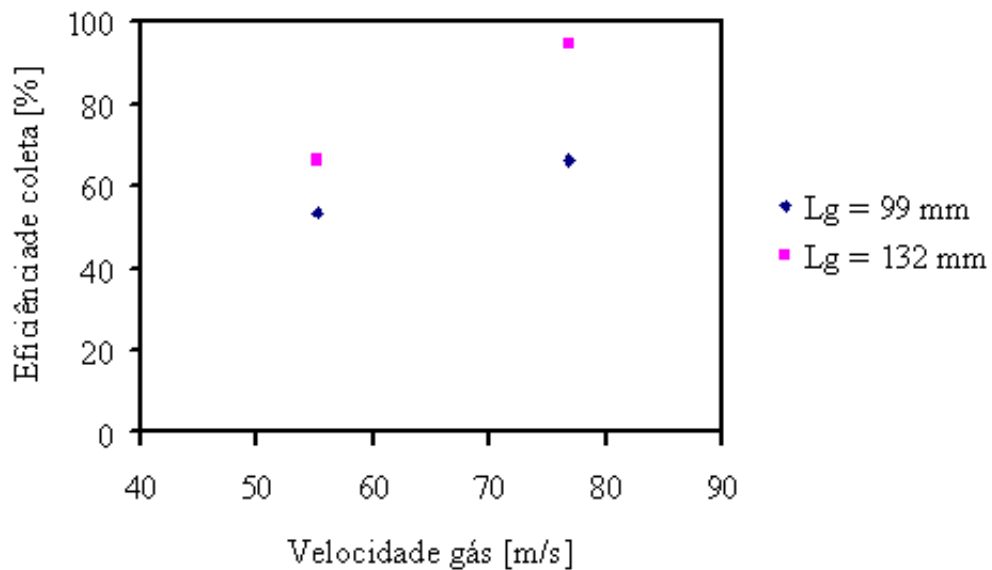


Figura 4.8: Efeito da velocidade do gás na garganta para  $Q_L = 340$  mL/min e  $d_p = 9,06$   $\mu\text{m}$ .

As Figuras 4.7 a 4.10 ainda mostram como a eficiência de coleta comportou-se diante dos diferentes comprimentos de garganta. O efeito desta variável foi estudado em alguns trabalhos como o OLIVEIRA e COURY (1996). Sabe-se que a coleta ocorre na região de maior velocidade relativa entre o gás e a gota. Dessa forma, a garganta deve ter comprimento suficiente para permitir a aceleração da gota até uma fração considerável

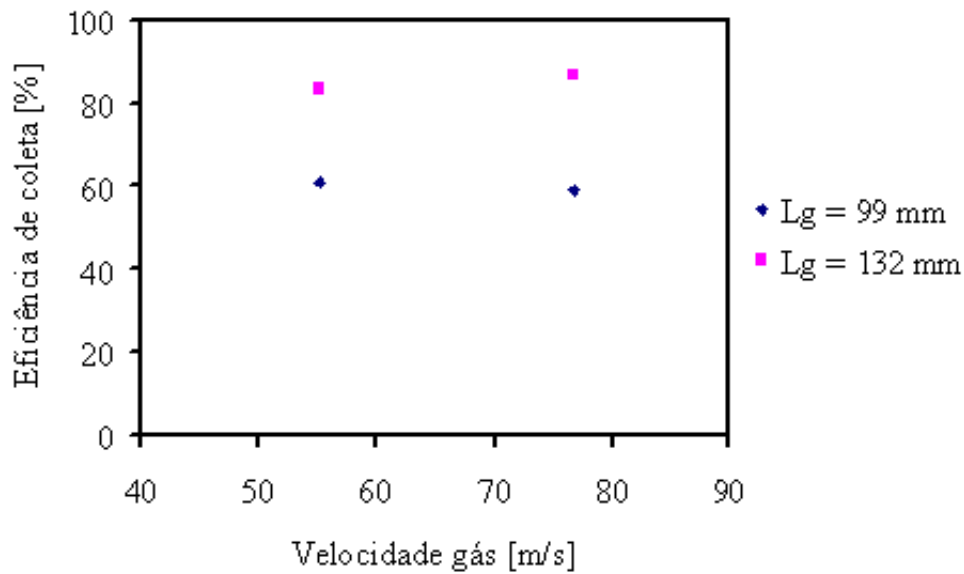


Figura 4.9: Efeito da velocidade do gás na garganta para  $Q_L = 500$  mL/min e  $d_p = 2,21$   $\mu$ m.

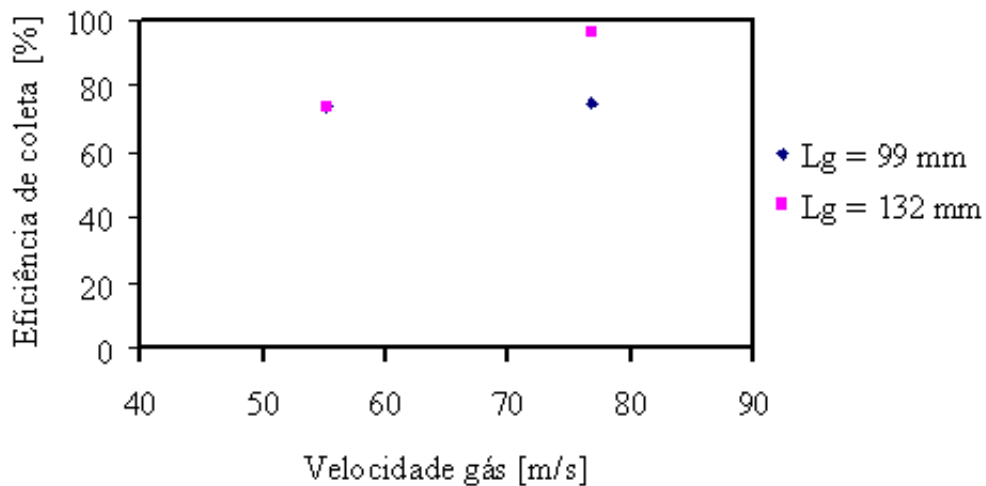


Figura 4.10: Efeito da velocidade do gás na garganta para  $Q_L = 500$  mL/min e  $d_p = 9,06$   $\mu$ m.

da velocidade do gás. Gargantas muito curtas podem diminuir a eficiência de remoção do lavador. Assim, nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, nota-se que o maior comprimento de garganta (132 mm) resultou em maiores valores de eficiência de coleta. Segundo MARTINS COSTA (2002), este comportamento explica-se pelo fato de que quanto mais se afasta do ponto de injeção de líquido mais uniforme é a distribuição das gotas na direção

transversal ao longo do Venturi e este efeito tende a aumentar a remoção de partículas. OLIVEIRA e COURY (1996) ressaltaram que o percentual de coleta de partículas é maior quando se aumenta o comprimento da garganta já que o tempo de residência do pó no fluxo de gás no interior da garganta é proporcional ao comprimento da mesma. Já para PLACEK e PETERS (1981) garganta mais compridas garantem maior tempo de contato entre o material particulado e a gota.

## 4.5 Influência da Vazão de Líquido e do Tamanho da Partícula

As Figuras 4.11 a 4.14 indicam como a vazão de líquido afeta na eficiência de coleta global das partículas parametrizadas no diâmetro da partícula.

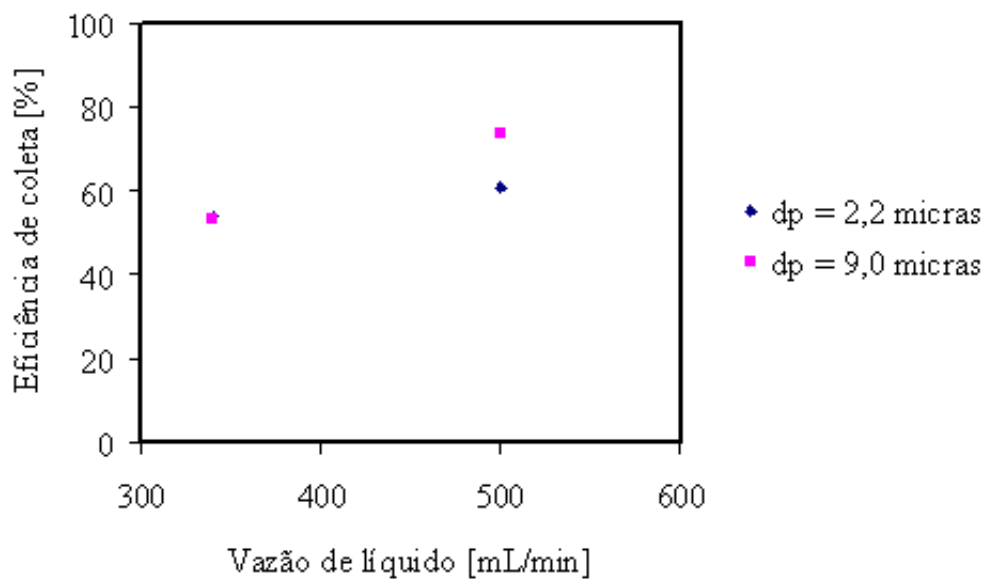


Figura 4.11: Efeito da vazão de líquido na eficiência global para  $V_G = 55,2$  m/s e  $L_g = 99$  mm.

A análise das Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostra que, para a vazão de líquido de 500 mL/min a porcentagem de partículas coletadas foi maior. Isto ocorreu porque com maior quantidade de líquido no interior da garganta do Venturi, o número de gotículas formadas foi maior, o que facilitou a colisão entre as partículas sólida e líquida, aumentando, conseqüentemente, a coleta das partículas de rocha fosfática.

Houve uma única condição experimental que este comportamento não foi observado. Como se pode ver na Figura 4.13, para a partícula de  $2,21 \mu\text{m}$  a eficiência de coleta apresentou uma pequena queda com o aumento da vazão de líquido. Pode ser atribuído

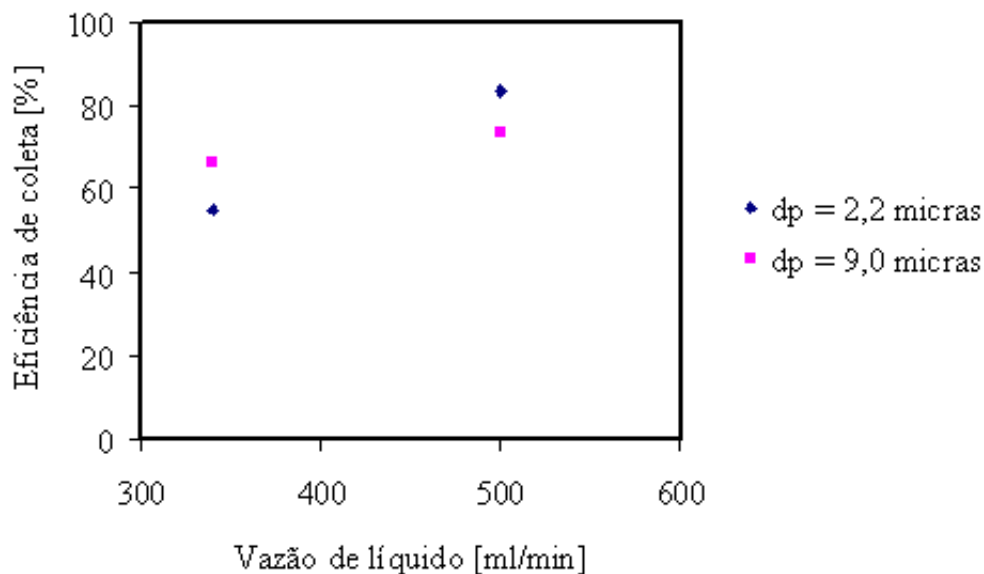


Figura 4.12: Efeito da vazão de líquido na eficiência global para  $V_G = 55,2$  m/s e  $L_g = 132$  mm.

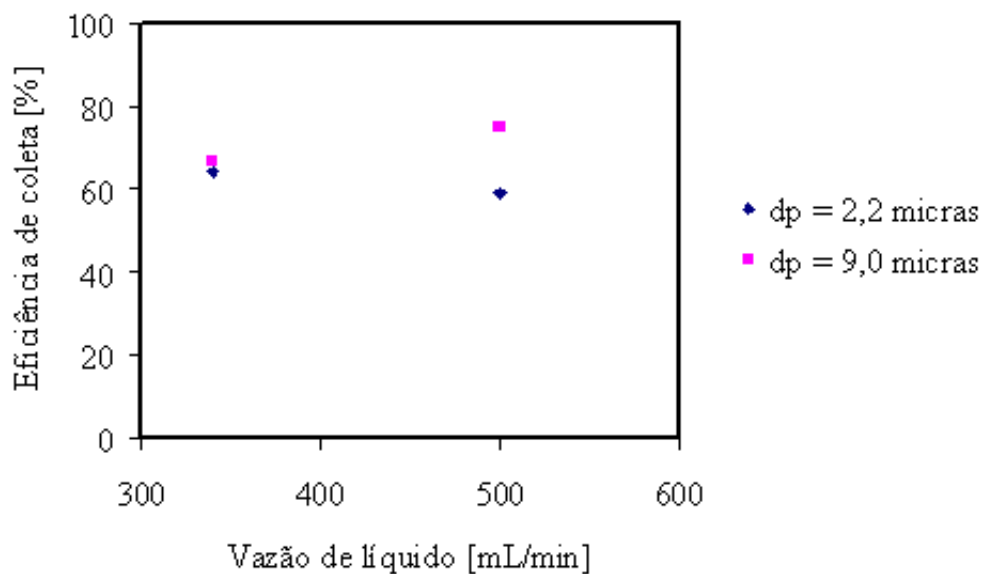


Figura 4.13: Efeito da vazão de líquido na eficiência global para  $V_G = 76,8$  m/s e  $L_g = 99$  mm.

que, para o comprimento de garganta de 99 mm, a penetração do jato de 15,8 mm tenha sido excessiva, levando a geração de um filme líquido, o que acarretou na diminuição da coleta do material.

O efeito do diâmetro da partícula também foi avaliado nas Figuras anteriores e verificou-se que partículas com maior diâmetro médio são coletadas com maiores eficiências.



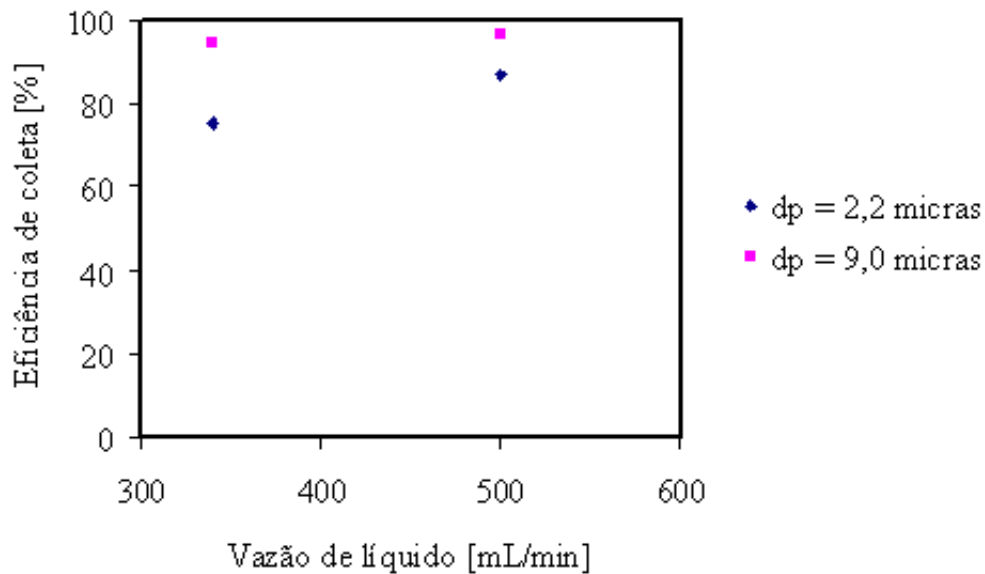


Figura 4.14: Efeito da vazão de líquido na eficiência global para  $V_G = 76,8$  m/s e  $L_g = 132$  mm.

Os fatores que levam a um aumento da eficiência para maiores valores de velocidade do gás na garganta do lavador também propiciam a atuação do mecanismo de impactação inercial, favorecendo a coleta das partículas de maiores diâmetros. Em 1954, JOHNSTONE *et al.* trabalharam com três aerossóis diferentes de diâmetros médios de 0,27, 0,58 e 1,22  $\mu\text{m}$  e observaram que a eficiência foi alta para altas taxas de líquido e para as maiores partículas. Eles ainda verificaram que a coleta ocorria até o final da seção do lavador e não apenas na garganta. A impactação das partículas nas gotas era grande próximo ao ponto de injeção, onde a diferença nas velocidades é grande. Quando as gotas são aceleradas, a eficiência por impactação decresce.

Na Figura 4.12, nota-se que na vazão de 500 mL/min, as partículas de 9,06  $\mu\text{m}$  foram removidas com eficiência menor que as partículas de 2,21  $\mu\text{m}$ . Como o material usado nos ensaios experimentais foi caracterizado pelo diâmetro médio, partículas maiores e menores que 2,21 e 9,06  $\mu\text{m}$  estavam presentes (como pode ser observado nas Figuras 3.1 e 3.2). Essa presença propiciou a atuação de outros mecanismos de coleta, que não apenas o de impactação inercial.

Tendo como base os trabalhos já realizados sobre a eficiência de lavadores Venturi, observou-se que os valores de remoção obtidos neste trabalho foram relativamente baixos. Para descobrir a fonte de erro, um experimento foi realizado com o objetivo de quantificar o balanço do líquido de lavagem. Para isso, não se inseriu material particulado na linha experimental, injetou-se apenas o líquido de lavagem. O resultado deste teste apontou que mesmo sem injeção de pó, no *underflow* do ciclone, as amostras recolhidas continham

rocha fosfática, ou seja, parte das partículas que era para ser recolhida no ciclone ficava retida nas paredes do equipamento, formando uma crosta de material, ineficiente para o cálculo da capacidade de remoção do Venturi. Outro fato interessante que o teste mostrou foi que a água recolhida no *underflow* do ciclone não era toda a água que entrava através do orifício de injeção na garganta do Venturi. Sendo assim, existiam dois lugares de destino do restante do líquido: na junção do lavador Venturi com a tubulação e no *overflow* do ciclone. Em relação à junção, era claramente perceptível que a quantidade de água perdida naquele local era mínima, uma vez que o lavador era ajustado firmemente à tubulação e uma fita isolante era aderida na união das duas partes. Dessa forma, verificou-se que a perda de água acontecia consideravelmente no *overflow* do ciclone e mais ainda, esta quantidade de líquido perdida não era apenas água, mas também gotas de água acopladas à partículas de rocha fosfática anteriormente removidas do fluxo de ar. Isto significa dizer que como a eficiência de separação de partículas de  $5,0 \mu\text{m}$  é menor no ciclone que no lavador Venturi (LAPPLE, 1951) e como o ciclone era o ponto final da unidade experimental, era ele quem limitava o processo de limpeza do gás.

## 4.6 Comparação com Modelos Teóricos

A comparação dos resultados experimentais de eficiência de coleta com os modelos teóricos de JOHNSTONE *et al.* (1954), CALVERT *et al.* (1972) e CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) é mostrada nas Figuras 4.15 a 4.24.

### 4.6.1 Cálculo da Eficiência Teórica do Modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954)

As Figuras 4.15 e 4.16 relatam que o modelo teórico subestimou os valores de eficiência experimentais.

Como o modelo de JOHNSTONE *et al.* não possui a variável comprimento da garganta como parâmetro, os valores de eficiência para o comprimento de 99 mm foram os mesmos encontrados para o comprimento de 132 mm.

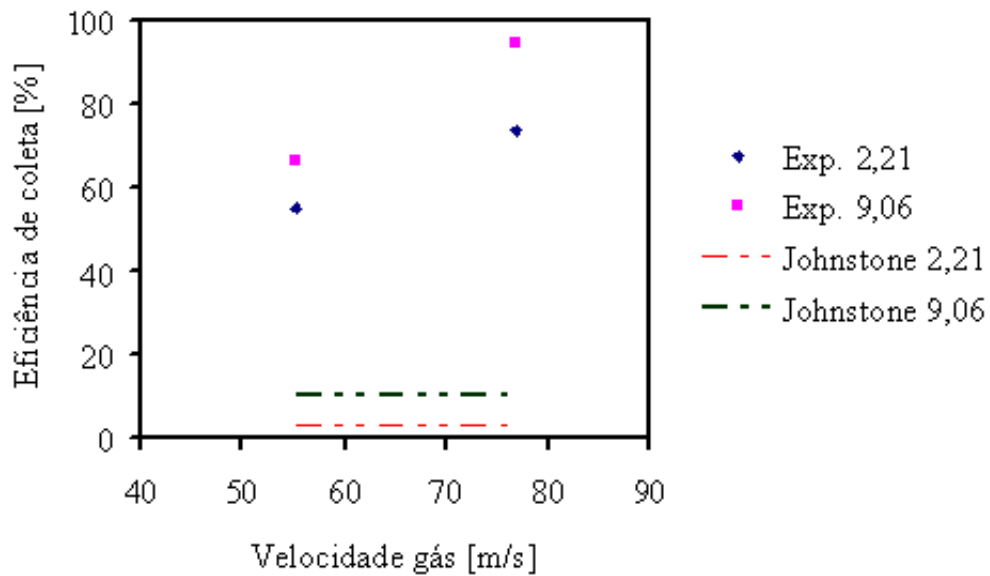


Figura 4.15: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de JOHNSTONE para  $Q_L = 340$  mL/min e  $L_g = 132$  mm .

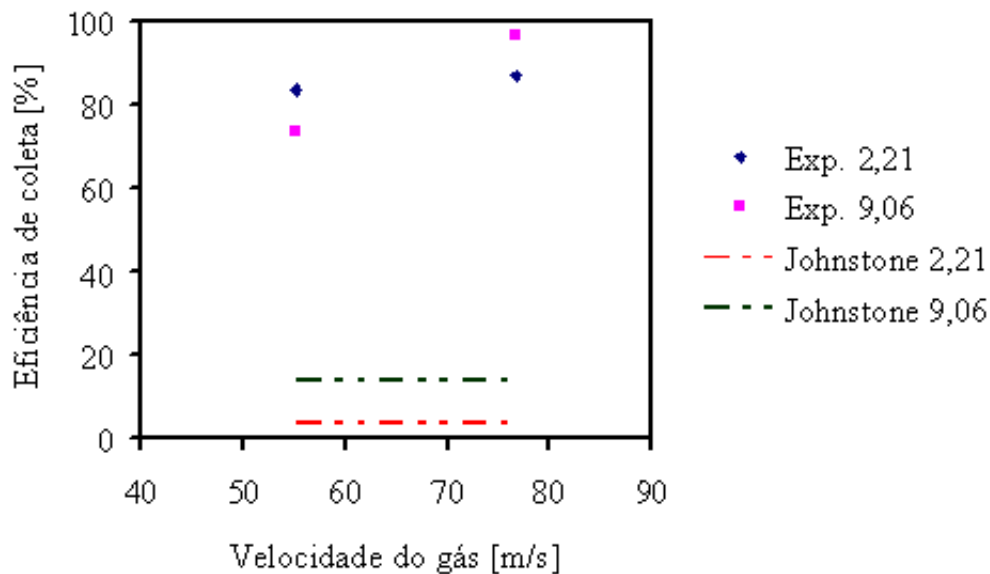


Figura 4.16: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de JOHNSTONE para  $Q_L = 500$  mL/min e  $L_g = 132$  mm .

#### 4.6.2 Cálculo da Eficiência Téorica do Modelo de CALVERT *et al.* (1972)

As Figuras 4.17 a 4.20 mostram a comparação da eficiência prevista pelo modelo de CALVERT *et al.* com aquela obtida experimentalmente.

De uma forma geral, o modelo de CALVERT *et al.* superestimou a eficiência de coleta quando a velocidade do gás era de 55,2 m/s e subestimou quando a mesma era de 76,8 m/s. Notou-se também uma queda na coleta do pó com o aumento da velocidade do gás. O que pode ter levado a estes comportamentos é que este modelo foi ajustado para uma faixa de velocidade de 60 a 120 m/s, ou seja, apenas uma das velocidades estudadas neste projeto pertenciam a esta faixa. A Tabela 4.4 mostra como o modelo previu eficiências de coleta de partículas mais altas para o material de maior diâmetro médio.

Tabela 4.4: Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT *et al.* (1972).

$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$V_G$ [m/s]	$\eta_{340\text{mL}/\text{min}}$ [%]	$\eta_{500\text{mL}/\text{min}}$ [%]
2,21	50	60,05	74,86
9,06	50	66,65	80,98
2,21	70	50,88	65,63
9,06	70	54,71	69,65

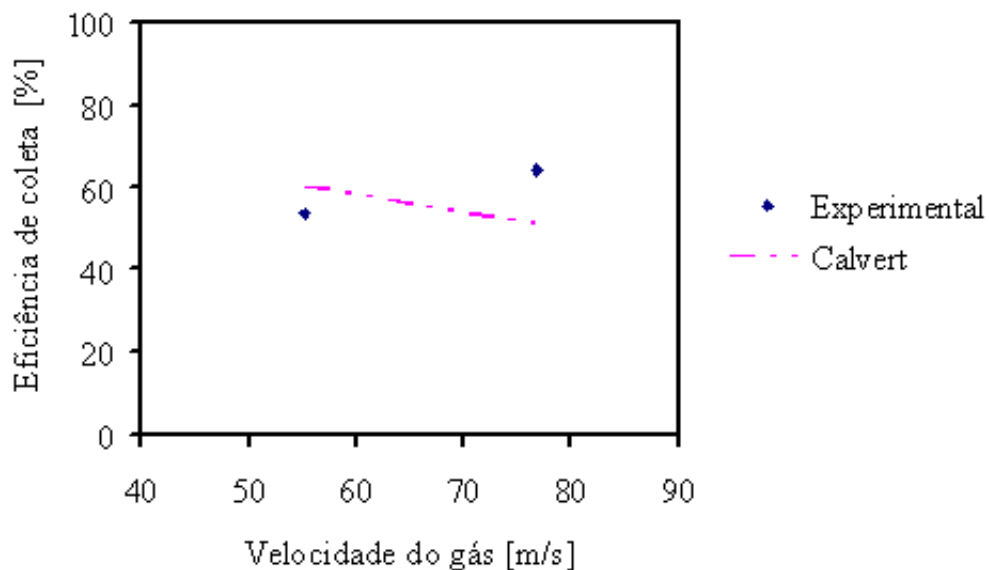


Figura 4.17: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para  $Q_L = 340$  mL/min,  $L_g = 99$  mm e  $d_p = 2,21$   $\mu\text{m}$ .

Na remoção de partículas de rocha fosfática de 2,21  $\mu\text{m}$  no lavador de 99 mm de comprimento de garganta e com a vazão de líquido de 500 mL/min, o modelo de CALVERT *et al.* superestimou a eficiência de coleta experimental (Figura 4.19). Um aumento na velocidade do gás leva a formação de gotas de líquido menores. Estas gotas podem ter sido eficientes na separação do material particulado da corrente gasosa no lavador Venturi, porém elas provavelmente saíram no *overflow* do ciclone, o que é negativo para a avaliação da eficiência de coleta em lavadores de gases, como foi evidenciado no teste com

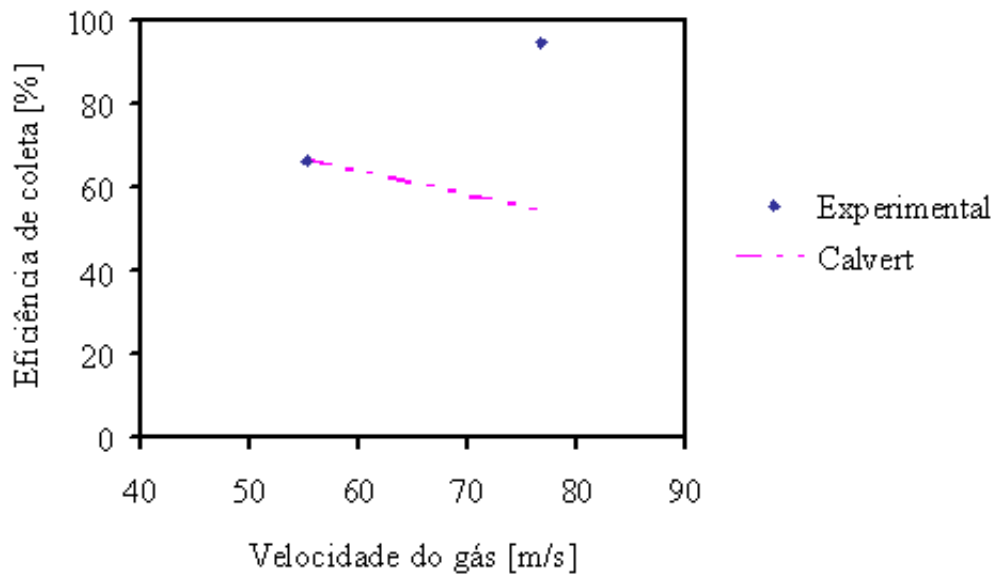


Figura 4.18: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para  $Q_L = 340$  mL/min,  $L_g = 132$  mm e  $d_p = 9,06$   $\mu\text{m}$ .

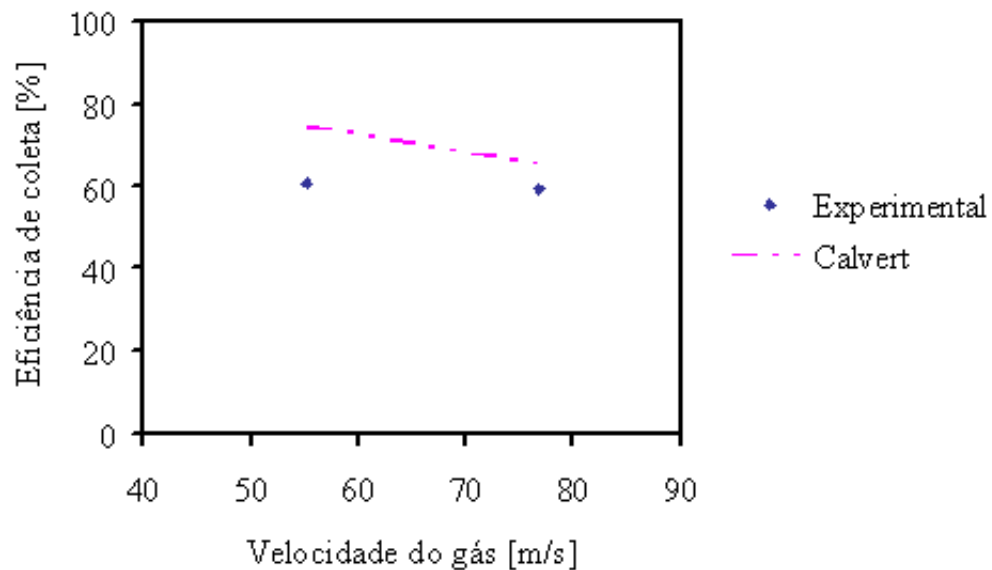


Figura 4.19: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para  $Q_L = 500$  mL/min,  $L_g = 99$  mm e  $d_p = 2,21$   $\mu\text{m}$ .

a água, discutido no item **4.5 Influência da Vazão de Líquido e do Tamanho da Partícula**.

Da mesma forma que o modelo de JOHNSTONE *et al.*, este modelo também não inclui a variável comprimento da garganta como parâmetro em sua equação.

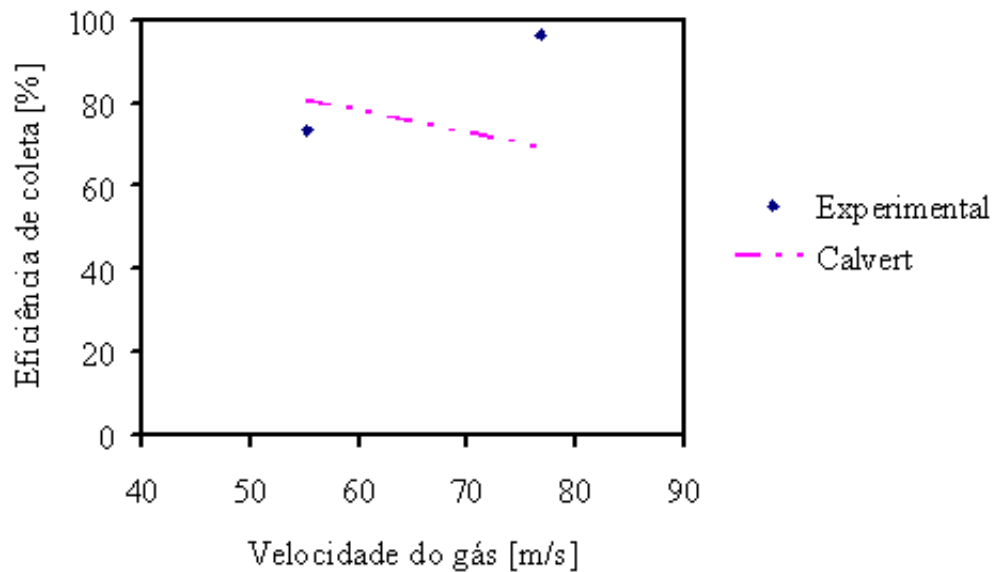


Figura 4.20: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT para  $Q_L = 500$  mL/min,  $L_g = 132$  mm e  $d_p = 9,06$   $\mu\text{m}$ .

### 4.6.3 Cálculo da Eficiência Téorica do Modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005)

A comparação dos resultados experimentais com o modelo de CALVERT modificado mostrou que a eficiência de coleta obtida no laboratório foi subestimada para todas as condições operacionais.

Uma particularidade deste modelo é que ele considera o comprimento da garganta como parâmetro da sua equação. E a análise estatística dos resultados experimentais mostrou que esta variável foi a que mais apresentou efeito na eficiência global de coleta (Figura 4.1). Sendo assim, o mesmo comportamento dos resultados experimentais foi previsto pelo modelo: a remoção do material foi maior quando se trabalhou garganta mais comprida. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram como o modelo previu eficiências de coleta de partículas mais altas para o material de maior diâmetro médio.

Tanto o modelo de JOHNSTONE *et al.* (1954), como o de CALVERT *et al.* (1972) e, conseqüentemente, a equação de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) consideram a coleta das partículas através do mecanismo de impactação inercial, o que é evidenciado no parâmetro inercial presente nas equações de todos estes modelos (item **2.5.2 Modelos de Eficiência de Coleta**). Como a coleta por impactação inercial atua na remoção de material particulado de diâmetros médio maiores, no caso de  $9,06$   $\mu\text{m}$ , foi por este motivo que o modelo subdimensionou mais a eficiência de coleta para as partículas de diâmetro

médio de  $2,21 \mu\text{m}$ .

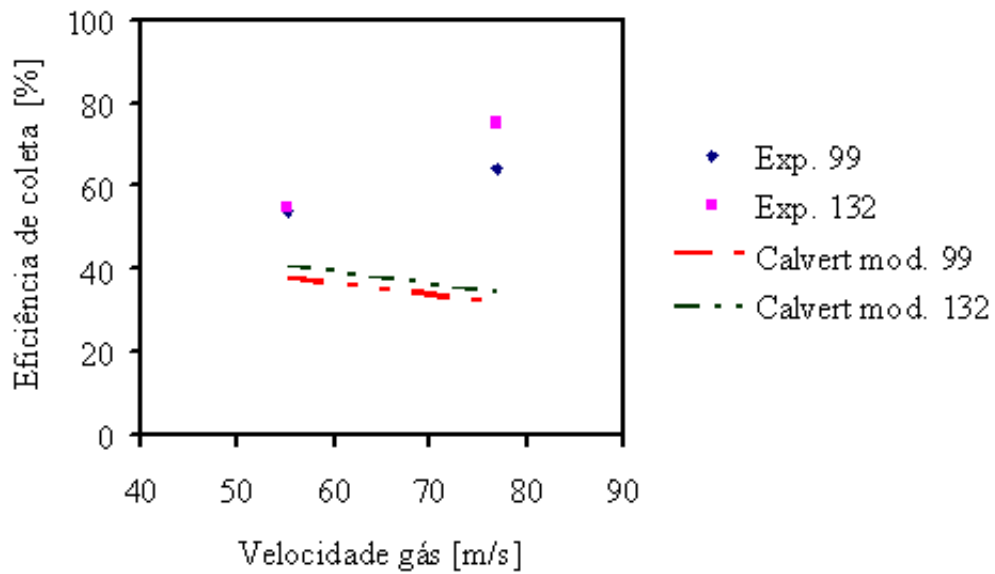


Figura 4.21: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para  $Q_L = 340 \text{ mL/min}$  e  $d_p = 2,21 \mu\text{m}$ .

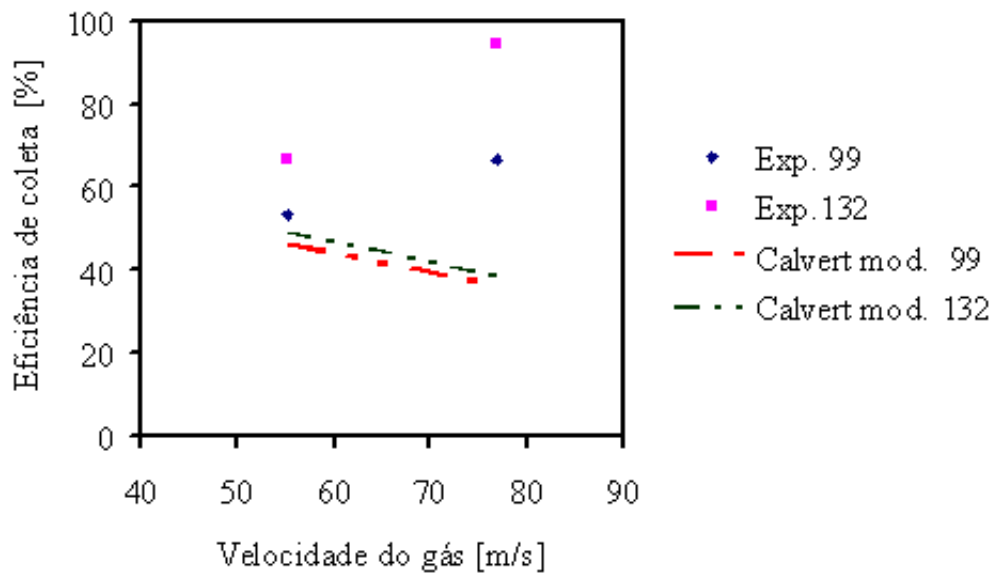


Figura 4.22: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para  $Q_L = 340 \text{ mL/min}$  e  $d_p = 9,06 \mu\text{m}$ .

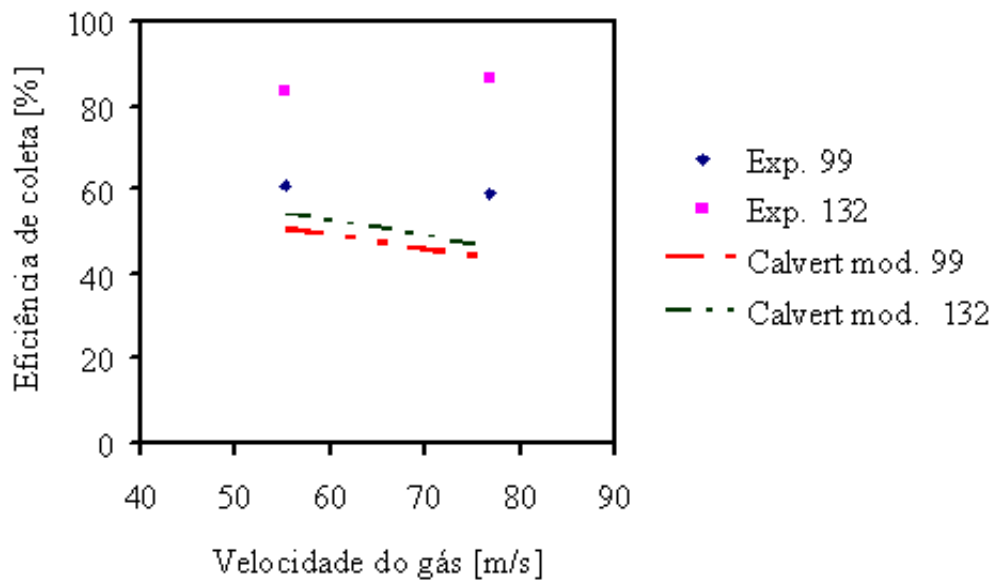


Figura 4.23: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para  $Q_L = 500$  mL/min e  $d_p = 2,21$   $\mu\text{m}$ .

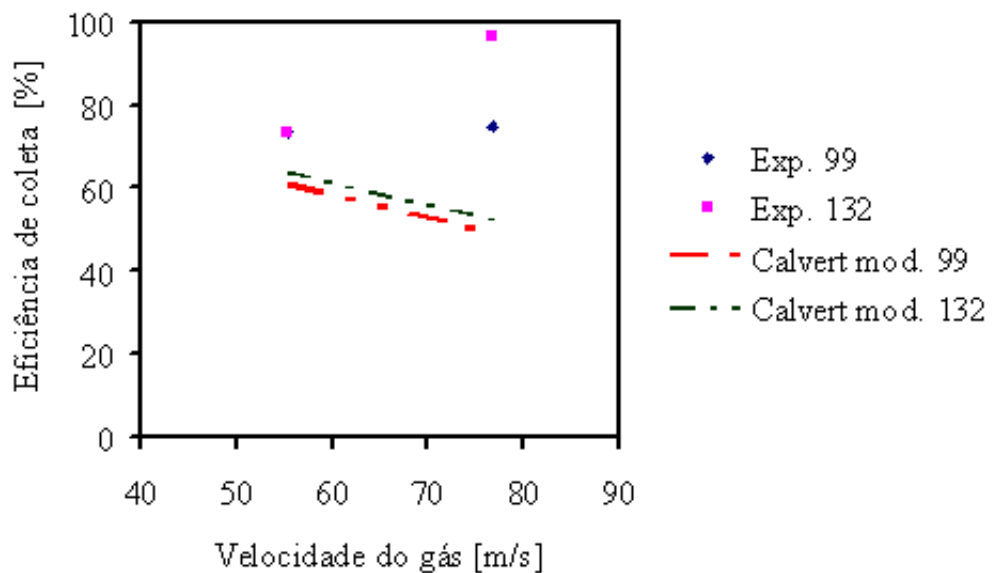


Figura 4.24: Comparação entre os valores de eficiência global de coleta experimentais e teóricos do modelo de CALVERT modificado para  $Q_L = 500$  mL/min e  $d_p = 9,06$   $\mu\text{m}$ .



Tabela 4.5: Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) para  $L_g = 99$  mm.

$d_p$ [ $\mu\mathbf{m}$ ]	$V_G$ [ $\mathbf{m/s}$ ]	$\eta_{340\text{mL}/\text{min}}$ [%]	$\eta_{500\text{mL}/\text{min}}$ [%]
2,21	50	37,65	50,81
9,06	50	46,25	60,68
2,21	70	31,70	43,57
9,06	70	36,25	49,21

Tabela 4.6: Resultados comparativos de eficiência de coleta prevista pelo modelo de CALVERT modificado (RIBEIRO, 2005) para  $L_g = 132$  mm.

$d_p$ [ $\mu\mathbf{m}$ ]	$V_G$ [ $\mathbf{m/s}$ ]	$\eta_{340\text{mL}/\text{min}}$ [%]	$\eta_{500\text{mL}/\text{min}}$ [%]
2,21	50	40,85	54,57
9,06	50	49,26	64,12
2,21	70	34,34	46,82
9,06	70	38,82	52,28

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## Conclusões e Sugestões

### 5.1 Conclusões

- A análise estatística dos resultados experimentais mostrou que todas as variáveis estudadas e ainda as interações da variável velocidade do gás com o comprimento da garganta e com a vazão de líquido tiveram efeito na eficiência global de coleta de partículas em lavadores Venturi de seção circular;
- O teste com água sem injeção de material particulado apontou a baixa eficiência do ciclone na separação das pequenas gotas formadas no lavador Venturi, removendo-as pelo *overflow* e, assim, afetando negativamente no cálculo da remoção global de partículas por parte do lavador;
- A maior eficiência global de coleta relatada foi de 96,5% quando as todas variáveis operaram em seus níveis superiores;
- A eficiência de coleta sofreu um acréscimo com o aumento da velocidade do gás e da vazão de líquido e isto afetou diretamente o mecanismo de coleta de partículas do tipo impactação inercial;
- Também diante do aumento da velocidade do gás e do comprimento da garganta, observou-se maiores percentuais de remoção de partículas, já que comprimentos maiores proporcionaram maior tempo de contato entre o pó e o líquido, o qual era melhor atomizado em velocidades de gás mais altas;

- O material particulado com diâmetro médio de  $9,06 \mu\text{m}$  foi removido com maiores eficiências que aquele com diâmetro médio de  $2,21 \mu\text{m}$ ;
- Partículas de diâmetro médio de  $2,21 \mu\text{m}$  foram removidas do fluxo gasoso com eficiência máxima de  $86,8\%$ , enquanto as partículas de  $9,06 \mu\text{m}$  apresentaram um percentual de coleta máximo de  $96,5\%$ ;
- De uma forma geral, todos os modelos teóricos testados subestimaram os valores de eficiências globais experimentais;
- O modelo de JOHNSTONE *et al.* foi o que melhor se ajustou aos resultados experimentais, uma vez que previu que partículas de  $9,06 \mu\text{m}$  foram removidas com maiores eficiências que as partículas de  $2,21 \mu\text{m}$  e que seguiu a tendência de aumento da eficiência com o aumento da velocidade do gás;
- O modelo de CALVERT *et al.* além de subestimar os valores experimentais de eficiência, não apresentou o comportamento de aumento da mesma à medida que a velocidade do gás sofria acréscimos;
- O modelo de CALVERT modificado também não relatou o comportamento esperado da eficiência diante da variação da velocidade do gás, entretanto mostrou valores de coleta mais altos para o comprimento de garganta de  $132 \text{ mm}$  que para o de  $99 \text{ mm}$ .

## 5.2 Sugestões

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar a atomização do jato líquido ao longo da garganta do lavador;
- Avaliar a formação de filme líquido nas paredes do Venturi;
- Utilizar fluidodinâmica computacional para simular a operação trifásica dos lavadores Venturi;
- Testar maior número de orifícios de injeção de líquido na garganta do lavador;
- Realizar um estudo sobre a eficiência fracionária de coleta de partículas.

---

---

# APÊNDICE A

---

## Simulação Fluidodinâmica

Com o objetivo de se ter uma noção do comportamento do fluxo gasoso no interior do lavador Venturi, simulou-se através do *software* comercial FLUENT 6.3.26 o escoamento desta fase.

Neste intuito, foram previamente levantados no laboratório os perfis de velocidade do gás na tubulação (2 in) anterior à entrada do Lavador Venturi em 5 distintas vazões volumétricas, cujos valores de velocidade média (Eq. (A.1)) serviram como condição de contorno inicial das simulações fluidodinâmicas propriamente ditas. Tais dados experimentais, incluindo também as respectivas quedas de pressão no tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm, estão contidos na Tabela A.1.

$$v_m = \frac{\int v \cdot dA}{\int dA} \quad (\text{A.1})$$

As condições de contorno e os métodos numéricos utilizados nas simulações fluidodinâmicas do escoamento do ar no interior do tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm podem ser visualizados na Tabela A.2.

As simulações foram feitas para cinco velocidades médias de entrada no lavador Venturi de 99 mm de comprimento de garganta. As Figuras A.1 e A.2 mostram o perfil da velocidade do ar e da queda de pressão no interior do lavador Venturi.

Nestas Figuras, fica claro como a velocidade do ar aumenta a medida que passa pela

Tabela A.1: Dados de velocidade do gás (m/s) no interior da tubulação e respectivas quedas de pressão experimentais no tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm.

Raio [cm]	430 Pa	1008 Pa	2085 Pa	4024 Pa	5825 Pa
-2,5	2,43	3,85	6,30	9,00	11,7
-1,5	3,45	5,20	7,35	11,00	13,3
0	3,82	5,65	8,35	11,80	14,6
1,5	3,45	5,20	7,35	11,00	13,3
2,5	2,43	3,85	6,30	9,00	11,7
$V_m [m/s]$	3,90	5,78	8,18	11,94	14,43

Tabela A.2: Condições de contorno e métodos numéricos no interior do tubo Venturi com comprimento de garganta de 99 mm.

Tipo de células computacionais	Quadrangular
Número de células computacionais	26000
Espaço	2D com eixo de simetria
Tempo	Estado estacionário
Modelo de turbulência	Reynolds Stress Model (RSM)
Acoplamento pressão-velocidade	Algoritmo SIMPLE
Discretização da pressão	Esquema PRESTO!
Discretização das variáveis	Esquema UPWIND de 2ª ordem
Critério de convergência	$1.10^{-4}$
Fluido	ar
Temperatura do escoamento ( $^{\circ}C$ )	25
Condição de contorno para a entrada	Velocidade média (Tabela A.1)
Condição de contorno para a saída	Pressão atmosférica local

seção convergente e entra na garganta do Venturi, onde ela atinge sua velocidade máxima que, em seguida, volta a diminuir ao entrar na seção divergente do lavador Venturi. Ao mesmo tempo, o comportamento observado da pressão é o contrário: na garganta do lavador é que se tem o menor valor de pressão.

Os valores simulados de queda de pressão foram levados ao módulo *NonLinear Estimation* do software STATISTICA 7.0 e correlacionados com os respectivos Números de Reynolds (Re), cujos resultados estão consignados na Tabela A.3.

Tabela A.3: Função matemática estimada para os dados simulados de queda de pressão.

Modelo	$-\Delta P = \alpha \cdot Re^2$
$\alpha$	$2,089 \cdot 10^{-6} \text{Pa}$
$R^2$	0,9998

A função matemática da Tabela A.3 foi posta na Figura 4.6 do Capítulo 4 sob a forma de linha contínua. Já os dados os dados experimentais da Tabela A.1 sob a forma de pontos. Essa curva mostra a boa concordância dos dados experimentais com os resultados da

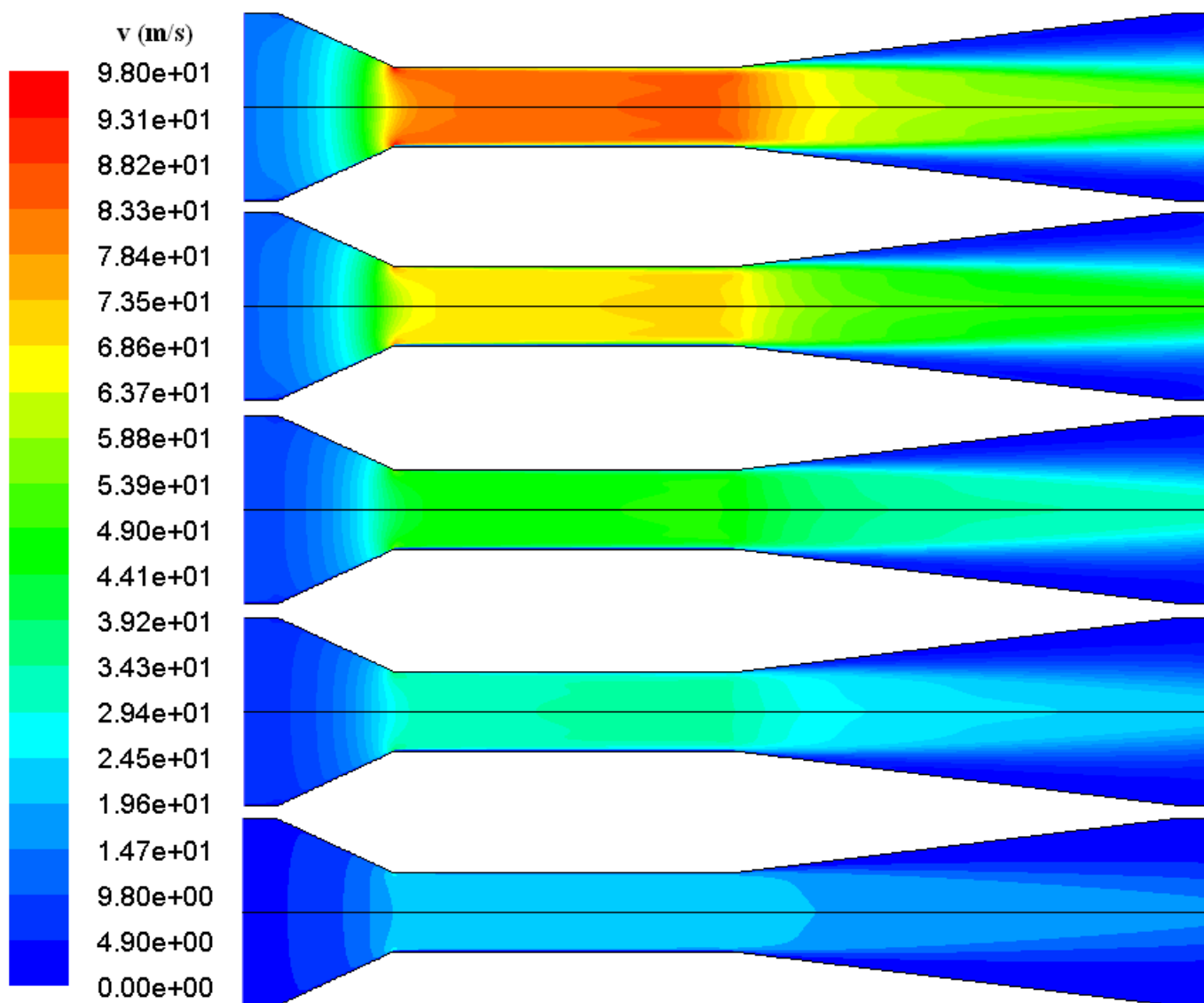


Figura A.1: Perfis de velocidade do gás ( $v$ ) simulados no interior do lavador Venturi com comprimento de garganta de 99 mm.

simulação, validando, dessa forma, os valores de queda de pressão obtidos experimentalmente e mostrando o comportamento esperado do fluido dentro do Venturi e a utilidade da aplicação de simulação fluidodinâmica.

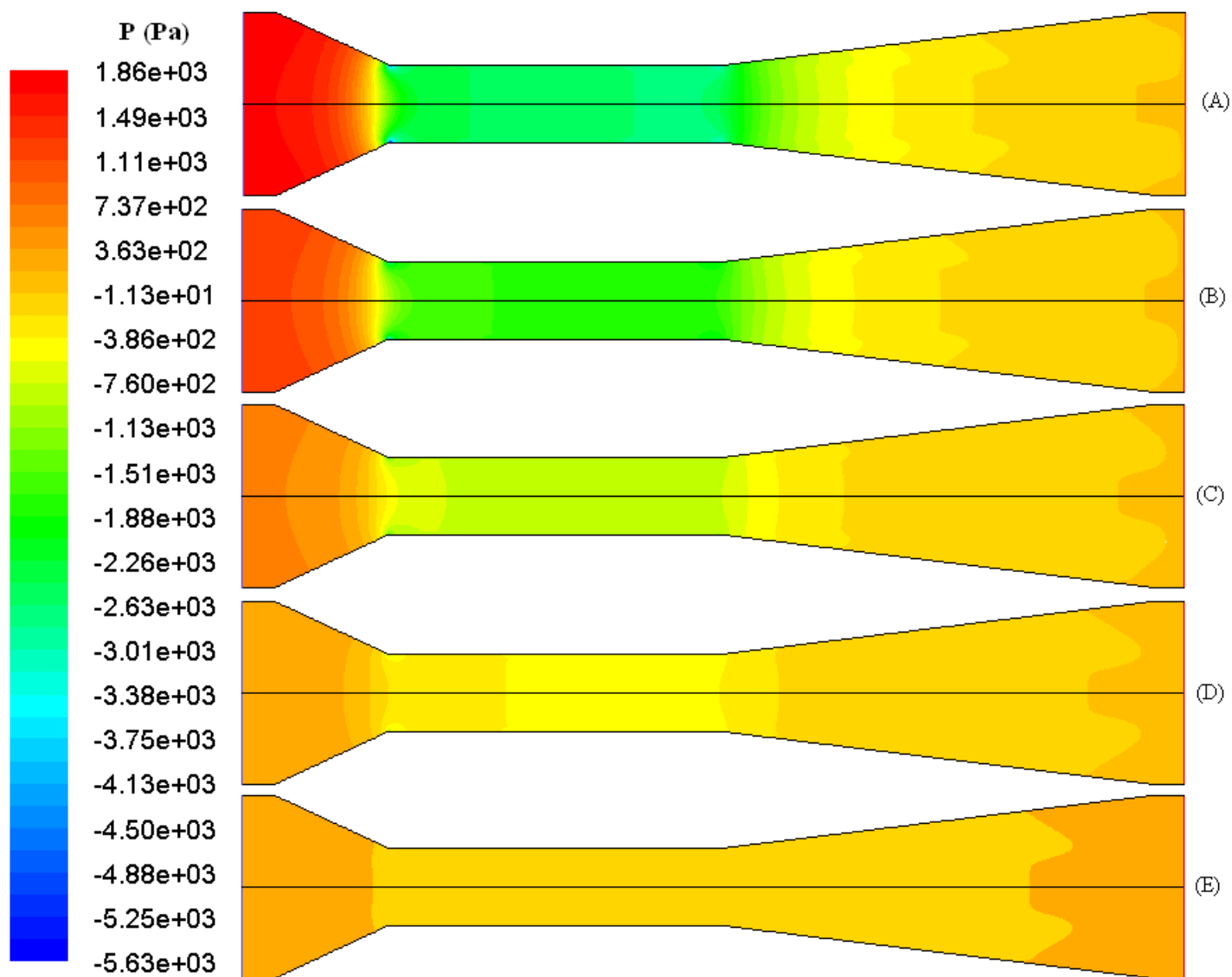


Figura A.2: Perfis de pressão estática ( $P$ ) simulados no interior do lavador Venturi com comprimento de garganta de 99 mm e respectivas quedas de pressão obtidas em cada uma das situações mencionadas: (A)  $-\Delta P = 5825$  Pa, (B)  $-\Delta P = 4024$  Pa, (C)  $-\Delta P = 2085$ , (D)  $-\Delta P = 1008$  e (E)  $-\Delta P = 430$ .

---

---

# APÊNDICE B

---

## Resultados Experimentais

Os resultados experimentais para eficiência de coleta dos lavadores Venturi estão apresentados nas Tabelas B.1 a B.2.

Tabela B.1: Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de  $2,21 \mu\text{m}$  e lavadores Venturi de 99 mm de comprimento de garganta.

$V_G$ [m/s]	$Q_L$ [mL/min]	Béquer [g]	Tempo coleta [s]	Béquer + rocha [g]	Rocha coletada [g]	Rocha alimentada [g]	$\eta$ [%]
55,2	340	117,38	20	118,92	1,54	2,86	53,8
55,2	340	109,81	20	111,68	1,87	2,86	65,3
55,2	340	111,33	20	113,26	1,93	2,86	67,4
76,8	340	117,77	20	119,61	1,84	2,86	64,2
76,8	340	110,02	20	112,56	2,54	2,86	88,7
76,8	340	111,96	20	114,54	2,58	2,86	90,1
55,2	500	110,89	15	112,03	1,14	1,87	60,8
55,2	500	113,34	15	115,35	2,01	1,87	107,0
55,2	500	109,88	15	111,71	1,83	1,87	97,6
76,8	500	110,86	15	111,84	0,98	1,87	52,3
76,8	500	111,84	15	112,95	1,11	1,87	59,2
76,8	500	111,20	15	112,28	1,08	1,87	57,6



Tabela B.2: Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de  $2,21 \mu\text{m}$  e lavadores Venturi de 132 mm de comprimento de garganta.

$V_G$ [m/s]	$Q_L$ [mL/min]	Béquer [g]	Tempo coleta [s]	Béquer + rocha [g]	Rocha coletada [g]	Rocha alimentada [g]	$\eta$ [%]
55,2	340	111,92	20	113,71	1,79	3,26	55,0
55,2	340	117,81	20	119,40	1,59	3,26	48,8
55,2	340	111,61	20	113,85	2,24	3,26	68,8
76,8	340	117,53	20	119,69	2,16	3,27	65,9
76,8	340	117,71	20	120,16	2,45	3,27	75,3
76,8	340	111,88	20	114,28	2,40	3,27	73,2
55,2	500	111,84	15	113,69	1,85	2,44	75,8
55,2	500	110,96	15	112,96	2,00	2,44	81,9
55,2	500	110,46	15	118,50	2,04	2,44	83,5
76,8	500	111,87	15	114,95	3,08	2,44	126,1
76,8	500	111,96	15	114,08	2,12	2,44	86,8
76,8	500	110,16	15	112,68	2,52	2,44	103,2

Tabela B.3: Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de  $9,06 \mu\text{m}$  e lavadores Venturi de 99 mm de comprimento de garganta.

$V_G$ [m/s]	$Q_L$ [mL/min]	Béquer [g]	Tempo coleta [s]	Béquer + rocha [g]	Rocha coletada [g]	Rocha alimentada [g]	$\eta$ [%]
55,2	340	110,26	20	111,78	1,52	2,94	38,8
55,2	340	116,93	20	119,02	2,09	2,94	53,4
55,2	340	109,94	20	111,98	2,04	2,94	52,1
76,8	340	111,85	20	113,50	1,65	2,94	42,1
76,8	340	110,99	20	113,16	2,17	2,94	55,4
76,8	340	116,47	20	119,07	2,60	2,94	66,4
55,2	500	109,90	15	111,90	2,00	3,92	68,1
55,2	500	110,83	15	113,15	2,32	3,92	79,0
55,2	500	111,87	15	114,03	2,16	3,92	73,6
76,8	500	111,87	15	113,73	1,86	3,92	63,3
76,8	500	112,01	15	114,21	2,20	3,92	74,9
76,8	500	110,13	15	112,27	2,14	3,92	72,9

Tabela B.4: Resultados de eficiência experimentais para material particulado de diâmetro médio de  $9,06 \mu\text{m}$  e lavadores Venturi de 132 mm de comprimento de garganta.

$V_G$ [m/s]	$Q_L$ [mL/min]	Béquer [g]	Tempo coleta [s]	Béquer + rocha [g]	Rocha coletada [g]	Rocha alimentada [g]	$\eta$ [%]
55,2	340	111,92	20	114,21	2,29	3,48	65,8
55,2	340	117,29	20	119,59	2,30	3,48	66,1
55,2	340	109,83	20	112,14	2,31	3,48	66,4
76,8	340	117,90	20	120,89	2,99	3,48	85,9
76,8	340	112,08	20	115,38	3,30	3,48	94,8
76,8	340	117,96	20	120,98	3,02	3,48	86,8
55,2	500	110,23	15	111,89	1,66	2,61	63,6
55,2	500	112,85	15	114,65	1,80	2,61	68,9
55,2	500	110,84	15	112,76	1,92	2,61	73,5
76,8	500	117,24	15	119,15	1,91	2,61	73,2
76,8	500	112,24	15	114,76	2,52	2,61	96,5
76,8	500	111,88	15	114,40	2,52	2,61	96,5

---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGRANOVSKI, I. E. E WHITCOMBE J. M. (2000), Optimisation of Venturi Scrubbers for the Removal of Aerosol Particles. European Aerosol Conference, vol.31, p. S164-S165.
- [2] ALONSO, D. F.; GONÇALVES, J. A. S.; AZZOPARDI, B. J. E COURY, J. R. (2001), Drop Size Measurements in Venturi Scrubbers. Chemical Engineering Science, vol.56, p.4901-4911.
- [3] ANANTHANARAYANAN, N. V. E VISWANATHAN, S.(1999), Predicting the Liquid Flux Distribution and Collection Efficiency in Cylindrical Venturi Scrubbers. Industrial and Engineering Chemistry Research, vol.38, p.223-232.
- [4] BEHIE, S. W. E BEECKMANS, J. M. (1974), Effects of Water Injection Arrangement on the Performance of a Venturi Scrubber. Journal of the Air Pollution Association, v.24, n.10, p.943-945.
- [5] CALVERT, S. (1970), Venturi and Other Atomizing Scrubbers Efficiency and Pressure Drop. AIChE Journal, v. 16, p.392-396.
- [6] COOPER, C. D. E ALLEY, F. F. (2002), Air Pollution Control - A Design Approach. 3a ed. Waveland Publishing, p.209.
- [7] GONÇALVEZ, J. A. S. (2000), Aspectos da Modelagem Matemática de Lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, São Paulo.
- [8] GONÇALVES, J. A. S.; COSTA, M. A. M.; HENRIQUE, P. R. E COURY, J. R. (2002), Atomization of Liquids in a Pease-Anthony Venturi Scrubber - Part I Jet Dynamics. Journal of Hazardous Materials, B97, p.267-279.

- [9] GONÇALVES, J. A. S.; COSTA, M. A. M.; AGUIAR, M. L. E. COURY, J. R. (2004), Atomization of Liquids in a Pease-Anthony Venturi Scrubber - Part II Droplet Dispersion. *Journal of Hazardous Materials*.
- [10] JOHNSTONE, H. F.; FIELD, R. B. E. TASSLER, M. C. (1954), Gas Absorption and Aerosol Collection in a Venturi Atomizer. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.45, p.1601-1608.
- [11] LAPPLE, C. E. (1951), Processes Use Many Collector Type. *Chemical Engineering*, v.58, p.144-151.
- [12] LEITH, D. E. COOPER, D. W. (1980), Venturi Scrubber Optimization. *Atmospheric Environment*, v.14, p.657-664.
- [13] LIMA, E. A. P. (2007), Um Estudo sobre a Qualidade do Ar de Uberlândia: Material Particulado em Suspensão. Tese de doutorado, Uberlândia, Minas Gerais.
- [14] MARTINS COSTA, M. A. (2002), Eficiência de Coleta de Partículas em Lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, São Paulo.
- [15] MARTINS COSTA, M. A.; RIBEIRO, A. P. R. A.; TOGNETTI, E. R.; AGUIAR, M. L.; GONÇALVES, J. A. S. E. COURY, J. R. (2005), Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Fine Powder from a Confined Gas Stream. *Materials Research*, v.8. n.2, p.177-179.
- [16] MAYINGER, F. E. LEHNER, M. (1995), Operating Results and Aerosol Deposition of a Venturi Scrubber in Self-Priming Operation. *Chemical Engineering and Processing*, v.34, p.283-288.
- [17] MEILI, L. (2006), Estudo do Desempenho de Lavadores de Gases do tipo Venturi com Seção Circular. Dissertação de mestrado, Uberlândia, Minas Gerais.
- [18] NUKIYAMA, S. E. TANASAWA, Y. (1938), Experiment on Atomization of Liquid by Means of Air Stream. *Transactions of the Society of Mechanical Engineers, Japan*, v.4, n,14, p.86-93.
- [19] OLIVEIRA, C. A. E. COURY, J. R. (1996), Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Inhalable Particles from the Air. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.13, n.01, p.09-20.
- [20] PLACEK, T. D. E. PETERS, L. K. (1981), Analysis of Particulate Removal in Venturi Scrubbers - Effect of Operating Variables on Performance. *AIChE Journal*, v.27, n.6, p.984-993.

- [21] PULLEY, R. A. (1997), Modeling the Performance of Venturi Scrubbers. *Chemical Engineering Journal*, v.67, p.9-18.
- [22] RIBEIRO, A. N. R. A. (2005), Estudo da Eficiência de Coleta em um Lavador Venturi com Injeção de Líquido por Multi-Orifícios. Tese de doutorado, São Carlos, São Paulo.
- [23] RUDNICK, S. N.; KOEHLER, J. L. M.; MARTIN, K. P.; LEITH, D. E COOPER, D. W. (1986), Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments and Theory. *Environmental Science and Technology*, v.20, n.3, p.237-242.
- [24] SCHIFFTNER, K. C. E HESKETH, H. E. (1996), *Wet Scrubber*. 2a ed., Technomic Publishing, Pennsylvania.
- [25] VISWANATHAN, S.; PIERRE, C. C. ST. E GNYP, A. W. (1983), Jet Penetration Measurements in a Venturi Scrubber. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.61, p.504-508.
- [26] [ww.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf](http://ww.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf) acesso em 09/02/2008.