

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

INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE INJEÇÃO DE LÍQUIDO POR ORIFÍCIOS
MÚLTIPLOS NA FORMAÇÃO DE GOTAS EM UM LAVADOR VENTURI

Vádila Giovana Guerra

São Carlos – SP
2009

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

**INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE INJEÇÃO DE LÍQUIDO POR ORIFÍCIOS
MÚLTIPLOS NA FORMAÇÃO DE GOTAS EM UM LAVADOR VENTURI**

Vádila Giovana Guerra

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

Orientador: José Renato Coury

São Carlos – SP

2009

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

G934ie

Guerra, Vádila Giovana.

Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi / Vádila Giovana Guerra. -- São Carlos : UFSCar, 2009. 154 f.

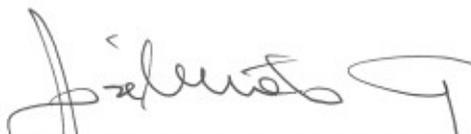
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Lavador Venturi. 2. Ar - poluição. 3. Limpeza de gases industriais. 4. Tamanho de gotas. 5. Engenharia química. I. Título.

CDD: 660.028 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE VÁDILA GIOVANA GUERRA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 20 DE FEVEREIRO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Renato Coury
Presidente, PPG-EQ/UFSCar



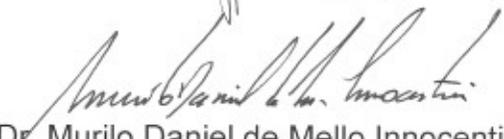
Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves
co-orientador, PPG-EQ/UFSCar



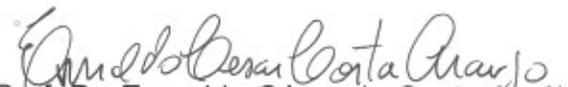
Prof. Dr. Fernando Martini Catalano
EESC/USP



Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Martins Costa
UNESP



Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
UNAERP



Prof. Dr. Everaldo César da Costa Araújo
DEQ/UFSCar

À minha mãe, Ilda
Ao meu pai Jordano (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que está sempre guiando meu caminho nesta jornada.

Aos meus pais, Jordano (em memória) e Ilda, por serem as referências mais importantes na minha vida. A minha eterna gratidão pelos ensinamentos, apoio e dedicação.

Ao professor José Renato Coury (Zezão) pela orientação, apoio, confiança e dedicação, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor José Antônio Silveira Gonçalves pela co-orientação e expressivas contribuições.

À minha irmã e amiga, Vanessa, pelo incentivo, apoio e amizade.

Ao meu cunhado, Nando, pelo apoio e as minhas queridas sobrinhas, Maria Clara e Maria Júlia, por renovarem e trazerem muitas alegrias a nossa família.

Ao Rodrigo, pelo amor, paciência e companheirismo durante estes anos. Muito obrigada por estar presente na minha vida, me incentivando e apoiando.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Controle Ambiental I pela alegre convivência, companheirismo e sugestões. Em especial a Marina, Simone, Edinalda, Néstor, Maristela, Eduardo Tanabe, Marcus Vinicius, Edmundo, Marcos Felicetti e Juliana Milanez.

Um agradecimento especial ao Kerton e a Maristela que me auxiliaram no desenvolvimento e conclusão deste trabalho e a Prof. Maria Angélica Martins Costa (Unesp) pelo auxílio no início deste estudo.

A todos os professores e funcionários do DEQ-UFSCar, em especial aos funcionários Oscar e Dorival pela disponibilidade e eficiência.

À CNPq e a Fapesp pelo suporte financeiro.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a chegar e concluir mais esta etapa da minha vida.

RESUMO

Lavadores Venturi são largamente utilizados industrialmente na limpeza de gases. Nesses lavadores, os elementos limpadores são as gotas formadas a partir da injeção de um líquido no gás contendo contaminantes. Tais gotas possuem a função de incorporar o elemento a ser removido. A injeção de líquido se dá normalmente através de vários orifícios, que promovem uma distribuição das gotas no duto. São raros os estudos experimentais que estudam a formação de gotas no lavador Venturi, principalmente no que diz respeito à variação do tamanho da gota com o número de orifícios de injeção de líquido. Dessa forma, o presente trabalhou realizou a investigação experimental dos efeitos que a injeção de líquido em múltiplos jatos exerce sobre a formação e distribuição de gotas num lavador Venturi. Utilizou-se no estudo um Venturi retangular em escala de laboratório, com uma garganta de 27 por 40 mm de secção transversal, situado horizontalmente. Para a medição de tamanho de gotas foi utilizado o equipamento Malvern Spraytec, que possibilita a medida *in situ* através da passagem de um laser pela garganta do lavador. Analisou-se o tamanho da gota variando o número de orifícios de injeção do líquido de 1 a 4, a vazão do líquido entre 300 e 1200 mL/min. e as velocidades do gás na garganta de 59, 64, 69 e 74 m/s (razões L/G de 0,07 a 0,3 L/m³). As posições axiais de medidas ao longo do lavador foram variadas entre 120 e 240 mm. Também se analisou o efeito destas variáveis operacionais na formação de filme líquido nas paredes do lavador. Os resultados experimentais mostraram que o aumento da vazão de líquido fez com que o líquido ficasse melhor distribuído no interior da garganta e também ocasionou a maior interação entre os jatos. O número de orifícios de injeção do líquido mostrou influência significativa no tamanho da gota medida na garganta do equipamento, ocorrendo o aumento do tamanho da gota com o aumento do número de orifícios em funcionamento. A interação entre jatos mostrou exercer influência no tamanho final da gota medida, já que os tamanhos das gotas foram maiores em jatos com maiores interações. Os aumentos na velocidade do jato líquido e do gás favoreceram o processo de atomização, fazendo com que os tamanhos das gotas diminuíssem. A fração de filme líquido depositada nas paredes do lavador Venturi também variou significativamente com o número de orifícios em funcionamento e conseqüentemente com as diferentes penetrações dos jatos. Em geral, jatos com penetrações excessivas geraram uma maior fração de filme depositada nas paredes do lavador e um menor tamanho de gotas. Através da análise de parâmetros adimensionais foi possível quantificar a influência de cada condição operacional nos tamanhos das gotas geradas no interior do lavador Venturi em estudo.

ABSTRACT

Venturi scrubbers are widely used in industrial plants in the cleaning of gases. In these scrubbers, the cleaning elements are the droplets formed at the injection of a liquid in the gas containing pollutants. The droplets act as collectors, incorporating the element to be removed. The liquid is usually injected through several orifices that promote a distribution of the droplets in the gas duct. The number of experimental studies in the formation of droplets in the Venturi scrubber is scarce, especially those concerned with the variation of the droplet size with the number of orifices of liquid injection. Therefore, the present work focused on the experimental investigation of the effects of the liquid injection in multiple jets in the formation and distribution of droplets in a Venturi scrubber. A laboratory scale scrubber, with a throat of 27 by 40 mm of cross-sectional, horizontally placed, was investigated. The data on droplet size was obtained with the Malvern Spraytec analyser, that makes possible *in situ* measurements by the passing a laser beam through the throat of the scrubber. The droplet size was analyzed varying the number of orifices of injection of the liquid from 1 to 4, the liquid flow rate between 300 and 1200 mL/min and the gas velocity in the throat of 59, 64, 69 and 74 m/s (L/G between 0.07 and 0.3 L/m³). The axial positions for measurements along the scrubber were varied between 120 and 240 mm. The effect of the formation of liquid film in scrubber walls was also analyzed. The experimental results showed that the increase of the liquid flow rate allowed a better distribution of the liquid inside the throat and also caused a stronger interaction among the jets. The number of injection orifices showed significant influence in the measured droplet size inside the throat, with the increase of the drop size with the increase of the number of orifices in operation. The interaction between jets and their droplets showed to have influence in the final size of the measured drop, since these sizes were larger in jets with larger interactions. The increases in the liquid jet and in the gas velocities favored the atomization process, causing decrease in the droplet sizes. The fraction of liquid film deposited in the walls of the scrubber varied significantly with the number of orifices in operation and consequently with the different penetrations of the jets. In general, jets with excessive penetrations generated a larger film fraction deposited in the walls of the scrubber and a smaller size of droplets. Through the analysis of dimensionless parameters, it was possible to quantify the influence of each operational condition in the size of the droplets generated inside of the studied Venturi scrubber.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xiii
NOMENCLATURA.....	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Lavadores.....	3
2.2. Mecanismos de coleta em lavadores.....	4
2.3. Lavadores tipo Venturi	6
2.4. Vantagens e desvantagens dos lavadores Venturi	8
2.5. Parâmetros que influenciam o desempenho de um lavador Venturi.....	9
2.6. Estudos da atomização e trajetória de jatos líquidos em correntes de ar.....	10
2.7. Distribuições do tamanho de gotas	14
2.7.1. Representação Gráfica da distribuição de tamanho de gotas	15
2.7.2. Funções matemáticas de distribuição.....	16
2.7.3. Diâmetros característicos	17
2.8. Métodos para medir tamanho de gotas	18
2.8.1. Método mecânico	19
2.8.1.1. Coleta de gotas em lâminas	20
2.8.1.2. Coleta de gotas em células	20
2.8.1.3. Impactadores cascata	21
2.8.2. Métodos elétricos	21
2.8.2.1. Técnica do fio carregado	21
2.8.2.2. Técnica do fio quente	21
2.8.3. Métodos ópticos	22
2.8.3.1. Análise fotográfica em alta velocidade	22
2.8.3.2. Contadores de partículas individuais (não imagem).....	23
2.9. Estudos realizados do tamanho de gotas no processo de atomização.....	30

2.10. Estudos sobre a fração de filme líquido.....	39
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. Aparato experimental.....	43
3.1.1. Testes preliminares.....	43
3.1.2. Novo Lavador Venturi	45
3.2. Condições experimentais	47
3.3. Trajetória do jato.....	48
3.4. Distribuição de tamanho de gotas	48
3.4.1 Analisador de gotas	48
3.4.2 Peça para acesso óptico do escoamento	50
3.5. Seção de extração de filme das paredes.....	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Testes preliminares	56
4.1.1. Histogramas e curvas cumulativas	56
4.1.2. Análise dos diâmetros médios variando as condições operacionais	65
4.2. Testes - Novo lavador Venturi.....	67
4.2.1. Imagens dos jatos líquidos	68
4.2.2. - Variação do diâmetro médio de Sauter para as diferentes condições experimentais	72
4.2.2.1 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a posição axial.....	72
4.2.2.2 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a razão L/G (L/m^3).....	76
4.2.2.3 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a velocidade do jato (V_j) e a velocidade do gás na garganta do lavador (V_g).....	78
4.2.2.4 – Variação do diâmetro médio de Sauter para as diferentes configurações de injeção.....	81
4.2.2.5 – Comparação dos diâmetros medidos experimentalmente com as correlações teóricas para previsão de tamanhos de gotas em lavadores Venturi.....	84
4.2.3. – Fração de Filme líquido extraído das paredes do lavador Venturi.....	87
4.2.4. – Estimativa de tamanho de gotas.....	93
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
5.1. Conclusões	101
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	103

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A - Resultados experimentais dos testes preliminares.....	109
APÊNDICE B - Resultados experimentais do Novo lavador Venturi	118
APÊNDICE C - Comparação entre os diâmetros de gotas medidos nos testes preliminares e os medidos no novo lavador Venturi para a injeção de líquido por um único orifício.....	149
APÊNDICE D - Análise dimensional baseada no teorema de Buckingham Pi.	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquemas dos tipos de lavadores de gás mais usados (Lora, 2002).	4
Figura 2.2 – Mecanismo de impactação inercial.	5
Figura 2.3 – Mecanismo difusional.	5
Figura 2.4 – Mecanismo da interceptação.	6
Figura 2.5 - Lavador Venturi típico.	6
Figura 2.6 - Jato transversal injetado na garganta do Venturi.	10
Figura 2.7 – Trajetória e penetração de um jato transversal segundo Viswanathan <i>et al.</i> (1983).	11
Figura 2.8 – Processo de ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal (a) Esquema demonstrando a ruptura de coluna e de superfície (Wu <i>et al.</i> , 1997) (b) Imagem com câmara de alta velocidade (Thawley, 2006)	13
Figura 2.9 - Histograma típico de tamanho de gota.	15
Figura 2.10 - Difração de um feixe de luz por um corrente de partículas.	24
Figura 2.11 - Esquema do Malvern Spraytec.	25
Figura 3.1- Vista esquemática da posição dos orifícios.	44
Figura 3.2 – Esquema do lavador Venturi com o comprimento total de garganta.	45
Figura 3.3 – Diferentes tamanhos de garganta	46
Figura 3.4 – Esquema da injeção de líquido na garganta do lavador.	46
Figura 3.5 – Ilustração da garganta utilizada na captura de imagens da penetração do jato.	48
Figura 3.6 - Esquema do Malvern Spraytec.	49
Figura 3.7 – Detalhe da janela para permitir a entrada do laser de análise das gotas.	50
Figura 3.8 – Vista geral do aparato experimental com o Malvern Spraytec.	51
Figura 3.9 – Esquema do lavador Venturi utilizado para a maior posição axial de medição do tamanho da gota.	52
Figura 3.10 - Extração do filme pelo método da fenda.	53
Figura 3.11- Seção de teste contendo fendas para a remoção do filme líquido.	53
Figura 3.12 - Vista geral do estrangulador.	54

Figura 3.13 – Esquema do lavador Venturi para a menor posição axial de extração do filme líquido.....	55
Figura 4.1 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 300$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm.....	58
Figura 4.2 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm.....	59
Figura 4.3 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm.....	60
Figura 4.4 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 3 orifícios – Modo 1 e $x = 120$ mm.....	61
Figura 4.5 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 5 orifícios e $x = 120$ mm.....	62
Figura 4.6 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min, 5 orifícios e $x = 120$ mm.....	63
Figura 4.7 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min, 5 orifícios e $x = 120$ mm.....	64
Figura 4.8 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da velocidade do gás para as diferentes vazões de líquido e números de orifícios de injeção de líquido, para $x = 120$ mm.....	65
Figura 4.9 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da vazão total de líquido injetada na garganta do lavador Venturi (Q_l) para as diferentes velocidades do gás e números de orifícios de injeção de líquido, para $x = 120$ mm.....	66
Figura 4.10 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da posição axial para as diferentes vazões de líquido injetadas na garganta do lavador e diferentes números de orifícios de injeção de líquido, para $V_g = 59$ m/s.....	67
Figura 4.11 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 300$ mL/min. ($V_j = 6,37$ m/s e $\ell^{**} = 10,29$ mm).....	69
Figura 4.12 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min. ($V_j = 12,74$ m/s e $\ell^{**} = 20,58$ mm).....	69
Figura 4.13 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 74$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min. ($V_j = 12,74$ m/s e $\ell^{**} = 16,41$ mm).....	69
Figura 4.14 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min. ($V_j = 6,37$ m/s e $\ell^{**} = 5,15$ mm).....	70
Figura 4.15 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 1100$ mL/min. ($V_j = 11,68$ m/s e $\ell^{**} = 19,08$ mm).....	70
Figura 4.16 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 74$ m/s e $Q_l = 1100$ mL/min. ($V_j = 11,68$ m/s e $\ell^{**} = 15,22$ mm).....	70

Figura 4.17 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 300$ mL/min. ($V_j = 2,12$ m/s e $\ell^{**} = 3,43$ mm).....	71
Figura 4.18 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min. ($V_j = 4,25$ m/s e $\ell^{**} = 6,86$ mm).....	71
Figura 4.19 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 1200$ mL/min. ($V_j = 8,49$ m/s e $\ell^{**} = 13,72$ mm).....	72
Figura 4.20 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 1 orifício, $V_g = 74$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x)..	73
Figura 4.21 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 2 orifícios modo 1, $V_g = 64$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).	74
Figura 4.22 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 2 orifícios modo 2, $V_g = 59$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).	74
Figura 4.23 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 3 orifícios, $V_g = 69$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).74	
Figura 4.24 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 4 orifício, $V_g = 74$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x)..	75
Figura 4.25 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 1 orifício, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.....	77
Figura 4.26 –Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 4 orifícios, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.....	77
Figura 4.27 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 2 orifícios modo 1, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.....	78
Figura 4.28 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 2 orifícios modo 2, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.....	78
Figura 4.29 – Variação do diâmetro médio de Sauter em função da velocidade do jato. (a) $x = 180$ mm e (b) $x = 240$ mm	80
Figura 4.30 – Comparação entre as velocidades para diferentes vazões de líquido $x = 180$ mm por 2 orifícios modo 2.	81
Figura 4.31 – Comparação entre as velocidades para diferentes vazões de líquido $x = 180$ mm por 4 orifícios.	81
Figura 4.32 - Comparação entre as configurações. (a) $x = 120$ mm e $V_g = 64$ m/s. (b) $x = 240$ mm e $V_g = 74$ m/s (c) $x = 180$ e $V_g = 59$ m/s (d) $x = 180$ e $V_g = 69$ m/s.	82
Figura 4.33 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício ($x = 240$ mm) (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 74$ m/s.	84

Figura 4.34 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido a partir de 300 mL/min. para cada orifício ($x = 240$ mm) (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 74$ m/s.	84
Figura 4.35 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s 1 orifício.	86
Figura 4.36 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s por 2 orifícios modo 1.	86
Figura 4.37 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s por 4 orifícios.	86
Figura 4.38 – Fração de líquido na forma de filme em função da razão L/G (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 64$ m/s (c) $V_g = 69$ m/s (d) $V_g = 74$ m/s.	88
Figura 4.39 – Fração de filme em função da penetração do jato/diâmetro hidráulico ($x = 100$ mm) (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 64$ m/s (c) $V_g = 69$ m/s (d) $V_g = 74$ m/s.	89
Figura 4.40 – Fração de filme em função da vazão de líquido (Ql) para todas as velocidades de gás e injeção feita através de 2 orifícios modo 1 ($x = 100$ mm).	90
Figura 4.41 – Fração de filme líquido em função da posição axial (x) para injeção de líquido feita por 4 orifícios e velocidade do gás de 74 m/s.	91
Figura 4.42 – Comparação entre os dados de fração de filme e algumas correlações propostas na literatura.	91
Figura 4.43 – Fração de líquido na forma de filme em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s.	93
Figura 4.44 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s.	93
Figura 4.45 – Posicionamento de L (largura) e H (altura) na garganta do lavador.	95
Figura 4.46 – Desempenho da correlação proposta pela equação 4.4 com os parâmetros da Tabela 4.1.	96
Figura 4.47 – Desempenho das correlações propostas (a) equação 4.4 com os parâmetros da Tabela 4.1, somente para as condições experimentais em que foram efetuadas a extração do filme das paredes do lavador Venturi. (b) equação 4.5 com os parâmetros da Tabela 4.2.	99
Figura A1 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm.	112
Figura A2 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 3 orifícios – Modo 2 e $x = 120$ mm.	113
Figura A3 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 64$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min, 5 orifícios e $x = 120$ mm.	114

Figura A4 – Variação do D_{32} experimental em função da velocidade para as diferentes vazões e números de injeção de líquido, para $x = 180$ mm.....	115
Figura A5 – Variação do D_{32} experimental em função da velocidade para as diferentes vazões e números de injeção de líquido, para $x = 240$ mm.....	115
Figura A6 – Variação do D_{32} experimental em função da vazão de líquido (Ql) para as diferentes velocidades e números de injeção de líquido, para $x = 180$ mm.	116
Figura A7 – Variação do D_{32} experimental em função da vazão de líquido (Ql) para as diferentes velocidades e números de injeção de líquido, para $x = 240$ mm.	116
Figura A8 – Variação do D_{32} experimental em função da posição axial em que foram realizadas as medidas para as diferentes vazões de líquido e números de injeção de líquido, para $V_g = 64$ m/s.	117
Figura A9 – Variação do D_{32} experimental em função da posição axial em que foram realizadas as medidas para as diferentes vazões de líquido e números de injeção de líquido, para $V_g = 69$ m/s.	117
Figura B1 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s.	131
Figura B2 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 64$ m/s.	131
Figura B3 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 69$ m/s.	131
Figura B4 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 59$ m/s.	132
Figura B5 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 69$ m/s.	132
Figura B6 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 74$ m/s.	132
Figura B7 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 $V_g = 64$ m/s.	133
Figura B8 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 $V_g = 69$ m/s.	133
Figura B9 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 $V_g = 74$ m/s.	133
Figura B10 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s.	134
Figura B11 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 64$ m/s.	134

Figura B12 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 74$ m/s.....	134
Figura B13 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 59$ m/s.....	135
Figura B14 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 64$ m/s.....	135
Figura B15 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 69$ m/s.....	135
Figura B16 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 59$ m/s.....	136
Figura B17 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 69$ m/s.....	136
Figura B18 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 74$ m/s.....	136
Figura B19 - Comparação entre as configurações para $x = 180$ mm e $V_g = 64$ m/s.....	137
Figura B20 - Comparação entre as configurações para $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s.....	137
Figura B21 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 59$ m/s.....	137
Figura B22 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 64$ m/s.....	138
Figura B23 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s.....	138
Figura B24 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 59$ m/s.	139
Figura B25 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 69$ m/s.	139
Figura B26 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s.	139
Figura B27 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s.	140
Figura B28 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s e $x = 180$ mm.....	140
Figura B29 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s e $x = 240$ mm.....	140
Figura B30 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min., 4 orifícios e $x = 240$ mm.....	141
Figura B31 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74$ m/s, $Q_l = 1200$ mL/min., 4 orifícios e $x = 240$ mm.....	142

Figura B32 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 300$ mL/min., 2 orifícios - modo 1 e $x = 240$ mm	143
Figura B33 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min., 2 orifícios - modo 1 e $x = 240$ mm	144
Figura B34 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min., 2 orifícios - modo 1 e $x = 240$ mm	145
Figura B35 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 64$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min., 1 orifício e $x = 240$ mm	146
Figura B36 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min., 2 orifícios –modo 2 e $x = 120$ mm.....	147
Figura B37 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min., 3 orifícios e $x = 120$ mm.....	148
Figura C1- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 59$ m/s $x = 120$ mm.....	150
Figura C2- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 64$ m/s $x = 180$ mm.....	150
Figura C3- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 69$ m/s $x = 240$ mm.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de diâmetros característicos.	17
Tabela 2.2 – Faixa de diâmetro para cada comprimento focal de lente	26
Tabela 2.3- Distância máxima permitida para cada comprimento focal das lentes.	27
Tabela 2.4 – Estudos de tamanho de gotas em lavadores Venturi	37
Tabela 3.1- Dimensões da geometria do lavador Venturi	43
Tabela 3.2 – Configurações de orifícios utilizadas nos testes.	44
Tabela 3.3- Dimensões da geometria do lavador Venturi	45
Tabela 3.4: Configurações de injeção do líquido	47
Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para a equação 4.4.....	96
Tabela 4.2 – Parâmetros ajustados para a equação 4.5.....	98
Tabela A1 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 120$ mm.....	110
Tabela A2 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 180$ mm.....	110
Tabela A3 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 240$ mm.....	111
Tabela B1 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 59$ m/s.....	119
Tabela B2 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 64$ m/s.....	120
Tabela B3 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 69$ m/s.....	121
Tabela B4 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 74$ m/s.....	122
Tabela B5 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 59$ m/s.....	123
Tabela B6 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 64$ m/s.....	124
Tabela B7 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 69$ m/s.....	125
Tabela B8 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s.....	126
Tabela B9 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 59$ m/s.....	127
Tabela B10 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 64$ m/s.....	128

Tabela B11 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s.....	129
Tabela B12 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 74$ m/s.....	130
Tabela D1: Valores das propriedades físicas utilizados nas equações 4.4 e 4.5.	154

NOMENCLATURA

Letras latinas

b_1 e b_2	Parâmetro da função de distribuição de tamanho de gotas de Nukiyama e Tanasawa	(-)
C_F	Razão do diâmetro médio de Sauter medido e o real	(-)
C_n	Concentração numérica	número/m ³
C_{nros}	Fator de correção para n_{ros}	(-)
C_{Xros}	Fator de correção para X_{ros}	(-)
D, d	Diâmetro	(L)
D_{30}	Diâmetro médio volumétrico	(L)
D_{32}	Diâmetro médio de Sauter	(L)
D_1	Diâmetro da lente	(L)
D_b	Diâmetro do feixe de laser	(L)
D_{dec}	Diâmetro do detector	(L)
$D_{eq,th}$	Diâmetro equivalente da garganta	(L)
D_h	Diâmetro hidráulico	(L)
E_{bs}	Energia luminosa medida no ponto central sem a presença do spray	(M L ² t ⁻³)
E_{ds}	Energia luminosa medida no ponto central com a presença do spray	(M L ² t ⁻³)
f	Comprimento da lente focal	(L)
FC_v	Fração volumétrica (diâmetros menores que D_d)	(-)
$FDP_N(D_d)$	Função de densidade populacional, Equação 2.21	(-)
Ff	Fração de filme líquido	(-)
H	Altura da garganta do lavador	(L)
L	Largura da garganta do lavador	(L)
\bar{l}	Penetração do jato sobre a dimensão da garganta, equação 2.36	(-)
l_A	Comprimento característico, definido pela equação 2.27	(L)
ℓ^*	Penetração do jato líquido	(L)
ℓ^{**}	Penetração central do jato líquido	(L)
L/G	Razão entre a vazão de líquido e a de gás	(L ³ /L ³)
MW	Massa Molecular	(M)
n	Medida da distribuição do tamanho de gota, quanto maior o valor de n mais uniforme é o spray.	(-)
N_o	Número de orifícios de injeção de líquido	(-)
<i>Obsc</i>	Obscurecimento	(-)

q	Fluxo de momento	(-)
Q	Vazão volumétrica	(L ³ t ⁻¹)
Re	Número de Reynolds	(-)
R _{eq}	Metade da distância equivalente ao número e posição dos orifícios, calculado para as diferentes configurações de injeção de líquido	(L)
R ₀	Metade da distância entre a parede pela qual o líquido está sendo injetado e a parede oposta	(L)
T	Transmissão	(-)
V	Velocidade	(L t ⁻¹)
W	Vazão mássica	(M t ⁻¹)
We	Número de Weber	(-)
X _{ros}	Diâmetro de gota tal que 63,2% da massa líquida total é formada por gotas de diâmetro menor que X	(L).
x	Distância entre o ponto de injeção do líquido e ponto de medição da gota	(L)
\bar{z}	Distância ao longo do lavador dada pela equação 2.35	(-)

Letras gregas

μ	Viscosidade	(M L ⁻¹ t ⁻¹)
ρ	Densidade	(M L ⁻³)
σ	Tensão superficial	(M t ⁻²)
Δ	Varição	(-)
Γ	Função gama	(-)

Subscritos

d	Gota
g	Gás
inj	Ponto de injeção
j	Jato
l	Líquido
m	Médio
o	Orifício
rel	Relativa
x	Referente à direção axial

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma grande preocupação das indústrias em investir no controle de suas emissões para a atmosfera. Dentre as razões para tal postura está o cumprimento das leis ambientais estabelecidas, a motivação em obter certificados internacionais de qualidade e a melhoria da imagem da indústria perante o público consumidor.

Devido ao aumento das restrições legislativas em relação à emissão de poluentes, surge a necessidade de buscar dispositivos de limpeza melhores e a melhoria dos dispositivos já existentes.

Entre os equipamentos utilizados para a limpeza de gases e controle de poluição, o lavador Venturi é um equipamento relativamente simples e de custo competitivo, que pode atender de maneira eficiente às necessidades das empresas que pretendem solucionar problemas de emissão de particulados ou gases tóxicos para a atmosfera.

O lavador Venturi é constituído basicamente por três seções: uma seção convergente, que se apresenta no início do equipamento, uma constrição, denominada garganta e a seção divergente ou difusor. O fluxo de ar pela garganta do lavador é forçado a fluir em alta velocidade e em seguida sofre uma desaceleração na seção divergente. O líquido usualmente injetado na garganta do Venturi é atomizado pelo fluxo de ar a alta velocidade. As gotas formadas pela atomização do líquido coletam as partículas. A coleta das partículas em um Venturi é o resultado de mecanismos de coleta que operam simultaneamente: a impactação inercial, a interceptação direta e a difusão. A contribuição de cada mecanismo depende do diâmetro da partícula, do tamanho de gota e suas velocidades relativas (Placek e Peters, 1981). As correlações existentes para predição da eficiência de coleta de partículas em um Venturi envolvem outros fenômenos tais como a razão líquido gás, penetração do jato líquido, distribuição das gotas em toda garganta, fração de filme líquido, comprimento da garganta, tamanho de gotas e a configuração geométrica do lavador (Adelberg, 1967; Azzopardi, 1993; Ananthanarayanan e Viswanathan, 1998; Gonçalves *et al.*, 2004).

O tamanho das gotas é um parâmetro importante que afeta o desempenho de um lavador Venturi. No entanto a quantidade de dados experimentais existentes sobre esse parâmetro especificamente em lavadores Venturi é restrita (Boll *et al.*, 1974; Atkinson e

Strauss, 1978; Bayel, 1982; Leith *et al.*, 1985; Costa *et al.*, 2003; Fernandez Alonso *et al.*, 2001, Viswanathan *et al.*, 2005). Além disso, os trabalhos existentes não levam em consideração a influência dos jatos no tamanho de gotas. As implicações práticas da injeção de jatos múltiplos incluem a sobreposição das nuvens de gotas, o aumento da coalescência e do filme de líquido nas paredes, etc., fenômenos esses que necessitam uma investigação mais detalhada.

Durante o processo de atomização e geração de gotas dentro do lavador Venturi uma parte do líquido injetada no equipamento acaba atingindo as paredes do lavador e acaba escoando na forma de uma película de líquido. A formação do filme líquido afeta o desempenho de coleta do lavador Venturi, pois ele pouco contribui para a coleta do material particulado além de proporcionar maior perda de carga dentro do equipamento.

O presente trabalho tem por objetivo, portanto, uma investigação experimental dos efeitos que a injeção de líquido em múltiplos jatos exerce sobre a formação e distribuição de gotas num lavador Venturi.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre lavadores Venturi abordando principalmente a formação e tamanho das gotas geradas no processo de atomização e também a fração de filme líquido depositada nas paredes do equipamento.

2.1. Lavadores

Os lavadores constituem uma classe de equipamentos de remoção de poeira e névoas de gases em que um líquido, usualmente a água, é adicionado ou circula para auxiliar o processo de coleta. Uma ampla variedade de unidades está disponível no comércio. Segundo Theodore e Buonicore (1988) (*apud* Lora, 2002) os lavadores de gás podem ser classificados em três grandes grupos.

- Torres de nebulização
- Instalações de leito empacotado
- Lavadores Venturi

Calvert (1984) (*apud* Lora, 2002) propõe uma classificação mais detalhada:

- Lavadores de bandeja
- Lavadores com recheio mássico
- Lavadores com recheio fibroso
- Sprays pré-formados
- Sprays nebulizados pelo gás
- Lavadores centrífugos
- Lavadores de chicanas e fluxo secundário
- Lavadores de impacto
- Lavadores acionados mecanicamente
- Lavadores de leito em movimento

Os parâmetros principais dos tipos de lavadores de gás mais difundidos são apresentados na Figura 2.1. Antes de analisar os dados inclusos nesta figura se faz necessário definir o parâmetro líquido/gás (L/G). A relação líquido/gás (L/G) é a relação entre a vazão de água utilizada para limpeza do gás e a vazão do mesmo que está sendo limpa, geralmente expressa em L/m^3 . Outros parâmetros utilizados na Figura 2.1 são: V_g = velocidade do gás e Δp = queda de pressão.

Na prática industrial os tipos de lavadores mais utilizados são os lavadores de bandejas e as diferentes variantes existentes dos lavadores tipo Venturi (sprays pré-formados e nebulizados por gás).

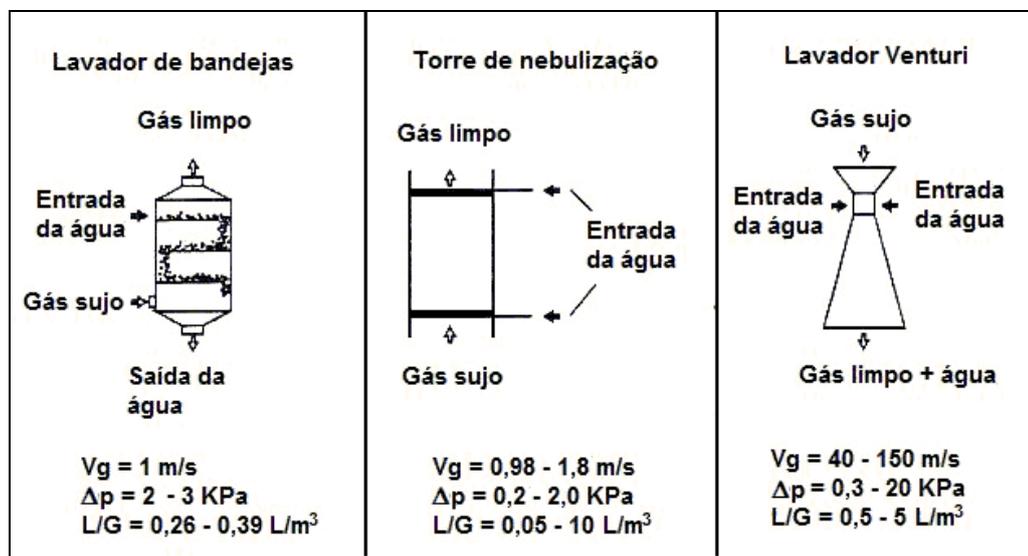


Figura 2.1 – Esquemas dos tipos de lavadores de gás mais usados (Lora, 2002).

2.2. Mecanismos de coleta em lavadores

Os mecanismos mediante os quais as partículas dispersas são removidas dos gases são: inércia, difusão e interceptação. As Figuras 2.2 a 2.4 mostram os mecanismos de coleta nos lavadores. Dentre os três mecanismos de coleta o predominante é a colisão por inércia. Os outros dois são considerados como modificadores de parâmetros que, em alguns casos, podem contribuir com uma ação significativa. Por exemplo, a difusão é eficaz com partículas menores que $0,1 \mu\text{m}$ quando a velocidade relativa entre a partícula e o corpo coletor é pequena. A interceptação pode ser significativa quando a trajetória da partícula for obstruída por um grande número de corpos coletores de diâmetro semelhante ao da partícula. Os efeitos combinados da difusão e da interceptação são de segunda ordem em comparação com os do mecanismo inercial na maioria das aplicações dos lavadores.

▪ *Colisão por Inércia*: Se pequenas partículas são dispersas através de um gás fluindo no qual há um obstáculo, a inércia fará as partículas abrir caminho através da corrente de fluxo que viaja ao redor do obstáculo e algumas das partículas se chocarão com ele. Nos lavadores, a impactação inercial ocorre entre as partículas de poeira e gotas relativamente grandes. Nesse caso, as partículas de poeira e gotas de água estão presentes em uma corrente de gás em movimento. As gotas recém formadas ficam quase paradas em relação ao gás que se desvia com facilidade das gotas em seu caminho, no entanto as partículas, com maior massa e inércia, não conseguem mudar rapidamente a sua trajetória e acabam por chocar-se com algumas gotas.

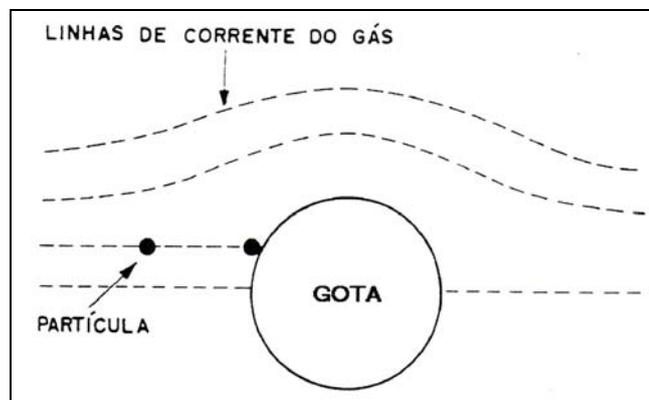


Figura 2.2 – Mecanismo de impactação inercial.

▪ *Difusão*: As partículas menores, principalmente as de diâmetro inferior a $0,3 \mu\text{m}$, têm significativo movimento browniano e não se movimentam uniformemente ao longo da linha de corrente do gás. Estas partículas difundem-se do gás para a superfície do corpo coletor, no caso as gotas e são coletadas.

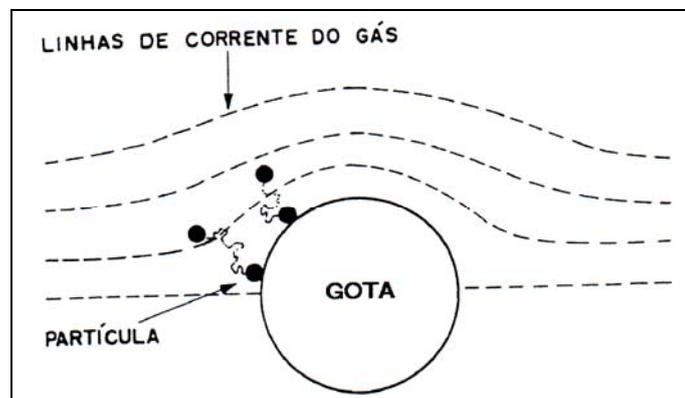


Figura 2.3 – Mecanismo difusional.

▪ *Interceptação*: As partículas também podem ser coletadas pela interceptação direta. A partícula pode seguir uma linha de corrente do gás e ser coletada sem impacto inercial ou

difusão browniana quando a linha de corrente for muito próxima do corpo coletor, porque a partícula acaba tocando a gota e conseqüentemente sendo coletada.

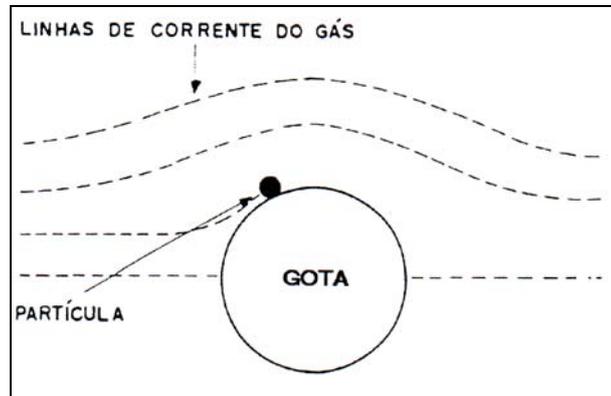


Figura 2.4 – Mecanismo da interceptação.

2.3. Lavadores tipo Venturi

Um dos lavadores mais utilizados industrialmente no tratamento de efluentes gasosos é o lavador tipo Venturi que é basicamente formado por um tubo, de seção transversal circular ou retangular, com uma constrição do tipo Venturi. Esse tipo de lavador possui três partes distintas: a seção convergente, a garganta e a seção divergente ou difusor, como pode ser visto na Figura 2.5.

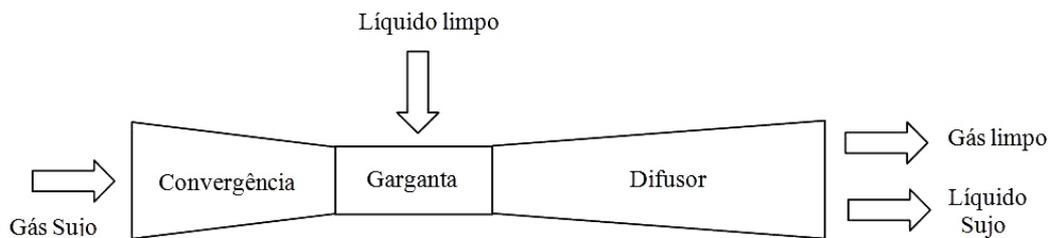


Figura 2.5 - Lavador Venturi típico.

O funcionamento do equipamento consiste na entrada do gás sujo pela seção convergente, o qual é acelerado devido ao estreitamento do duto e atinge sua velocidade máxima na garganta, sofrendo desaceleração na seção divergente. O Venturi é dimensionado de modo que o gás atinja uma velocidade superficial na garganta normalmente entre 40 a 150 m/s.

Para a retirada dos contaminantes da corrente gasosa é injetado um líquido de lavagem no equipamento. Normalmente utiliza-se água, no entanto, pode-se recomendar a utilização de óleos ou soluções básicas, dependendo da natureza e afinidade do contaminante.

A injeção do líquido pode ser feita através de orifícios feitos sobre as paredes do equipamento, geralmente na garganta. Essa é a forma mais comum de se fazer a injeção e faz com que o líquido assuma a forma de jatos. Quando a direção do jato é paralela à velocidade do gás, o jato é denominado paralelo, nos demais casos o jato é dito transversal. A desintegração do jato em gotas ocorre quando o líquido emerge do orifício como um corpo contínuo de forma cilíndrica e passa a interagir com uma corrente de gás ao seu redor. A “competição” sobre a superfície do jato das forças coesivas e de rompimento ocasiona o crescimento das oscilações e perturbações, proporcionando o aparecimento de ondas na superfície do jato. Sob condições favoráveis as oscilações são ampliadas e o corpo líquido se desintegra em gotas. Este processo é definido como atomização primária. Se as gotas formadas excedem um tamanho crítico, elas mais adiante se desintegram em gotas menores em um processo conhecido como atomização secundária. Esse mecanismo de formação e crescimento de ondas na superfície do jato foi primeiramente descrito por Castleman (1932 *apud* Lefebvre, 1989). As propriedades dos jatos de maior interesse são o comprimento contínuo, a maneira na qual o jato se desintegra e o tamanho da gota formada.

Outra forma de realizar a injeção do líquido é na forma de um filme aderido às paredes do equipamento, para isso pode-se utilizar paredes porosas, vertedouros, ou sistemas de orifícios ou fendas para irrigar diretamente as paredes. Quando ocorre a injeção do líquido, este possui a forma de jatos ou filme, dependendo do tipo de injeção realizada. No entanto, devido à alta energia do gás esse líquido é rapidamente atomizado formando assim, um spray, ou grande número de gotas de tamanhos variados. A injeção na forma de cortina é feita através de fendas (aberturas ou cortes de pequena espessura) e podem ser classificadas de acordo com o ângulo inicial que o líquido faz com o gás, podendo ser paralela ou transversal.

Devido à ação conjunta da atomização, que faz com que a área superficial do líquido aumente, a turbulência do escoamento e a alta velocidade do gás fazem com que haja um favorecimento da transferência de massa entre as fases gasosa e líquida, assim como, a coleta de material particulado pelas gotas.

Como pode ser visto na Figura 2.5, na saída do lavador Venturi tem-se uma corrente bifásica formada por líquido sujo e gás limpo, tornando-se necessário a utilização de um equipamento na saída do mesmo para fazer a separação das duas fases. Geralmente utiliza-se um ciclone após o difusor para realizar essa tarefa. A eficiência global do sistema lavador Venturi + ciclone praticamente independe do ciclone e pode ser considerada igual à eficiência do lavador isolado (Johnstone *et al.*, 1954).

Dentre os diversos tipos de lavadores Venturi encontrados no mercado as principais diferenças entre eles dizem respeito ao modo de injeção do líquido na garganta, a forma geométrica da seção transversal, a maneira de conectar o ciclone separador ao lavador Venturi e ao comprimento da garganta.

Os mais comuns formatos de gargantas são retangulares, circulares e anulares. A largura e comprimento (ou diâmetro no caso da garganta circular) da garganta são muito importantes para alcançar completa cobertura da garganta com o líquido de lavagem.

A forma clássica de lavador Venturi é conhecida como *Pease-Anthony*. O líquido é injetado na forma de jatos, através de orifícios normalmente situados na garganta, formando uma cortina de líquido através da mesma. A alta velocidade do gás atomiza o líquido em finas gotas, as quais capturam as partículas da corrente de gás. O Venturi *Pease-Anthony* pode ser montado horizontalmente ou verticalmente, dependendo do layout da planta. A garganta pode ser circular ou retangular na seção de corte e ele pode ser ajustado para obter alta eficiência de coleta em vazões de gás variadas. A conexão do Venturi com o ciclone pode ser tangencial ou turbinada.

No lavador Venturi do tipo *parede molhada* a injeção do líquido é feita na forma de filme aderido às paredes do equipamento. A garganta pode ser oval, retangular, circular ou na forma anular. Recomenda-se a utilização desse tipo de lavador quando se tem partículas pegajosas ou corrosivas na corrente gasosa e torna-se necessário evitar o depósito das mesmas nas paredes do equipamento (Azzopardi, 1993).

No lavador Venturi do tipo *ejetor* ou *spray pré-formado* o líquido já entra no equipamento na forma de spray devido a um bocal especial para atomização, diferentemente dos demais lavadores do tipo Venturi em que o líquido é atomizado devido a ação do gás. O líquido de lavagem entra no ejedor, sob pressão, através de um orifício localizado no topo e é forçado em alta velocidade através de uma garganta de Venturi. A grande turbulência criada pela alta velocidade do líquido provoca um eficiente contato entre as duas fases. Este tipo de lavador é indicado para capturar gases (Calvert, 1977; Atay *et al.*, 1987).

2.4. Vantagens e desvantagens dos lavadores Venturi

Os lavadores Venturi são muito utilizados para a limpeza de efluentes gasosos de diversas indústrias, tais como, metalúrgicas, indústrias de papel, fertilizantes, tintas dentre outras.

Comparando o lavador Venturi com outros equipamentos utilizados na limpeza de gases ou mesmo com outros tipos de lavadores pode-se notar que os lavadores desse tipo possuem algumas vantagens e desvantagens. Como vantagens têm-se:

- É compacto, ocupando pouco espaço na instalação industrial.
- Possui alta eficiência na coleta de partículas na faixa respirável (0,5 a 5 μm).
- Pode reutilizar o líquido de lavagem.
- Pode remover ao mesmo tempo contaminantes particulados e gasosos.
- Pode coletar pós explosivos, inflamáveis, pegajosos e aderentes, pelo fato de operar com coletores líquidos.

Algumas das desvantagens são:

- Consome muita energia possuindo assim, um elevado custo operacional. Devido à alta queda de pressão global desse tipo de lavador, surge a necessidade de sopradores mais potentes.
- Após a coleta do contaminante da fase gasosa surge o problema do destino final do efluente líquido sujo que algumas vezes não pode ser descartado sem tratamento.

2.5. Parâmetros que influenciam o desempenho de um lavador Venturi

Em lavadores Venturi a eficiência de coleta é influenciada por vários fatores, tais como:

- Tamanho da partícula a ser coletada
- Razão líquido gás (L/G)
- Fração de líquido que se deposita na parede na forma de filme
- Comprimento da garganta
- Configuração geométrica do lavador
- Distribuição do tamanho de gotas
- Evolução das gotas ao longo do Venturi
- Penetração do jato líquido

Dentre os fatores citados, a penetração do jato líquido e as características das gotas formadas no lavador Venturi, tais como a distribuição do tamanho e a uniformidade, além da fração de líquido depositado nas paredes do lavador são considerações importantes na operação e na determinação da eficiência deste lavador.

2.6. Estudos da atomização e trajetória de jatos líquidos em correntes de ar

O líquido para limpeza do gás em um lavador, geralmente, é introduzido através de pequenos orifícios localizados no início da garganta. Quando o líquido passa através do orifício, ele assume a forma de um jato inicialmente transversal à corrente de gás. Esse jato sofre uma curvatura devido à força de arraste, como pode ser observado na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Jato transversal injetado na garganta do Venturi.

Inicialmente, o jato é um corpo contínuo de líquido. Porém, a atomização ocorre rapidamente, formando um grande número de pequenas gotas. As gotas recém formadas se localizam nas proximidades da trajetória do jato e posteriormente se espalham por arraste e difusão turbulenta (Gonçalves *et al.*, 2004).

As gotas formadas da atomização do jato são as responsáveis pela coleta dos contaminantes existentes na corrente gasosa. Dessa forma, a eficiência de um lavador é afetada pelas características das gotas formadas, tais como: tamanho, quantidade, velocidade relativa e distribuição espacial. Por outro lado, estas características são em parte determinadas pelas características do jato, como: velocidade do jato, diâmetro, trajetória, penetração na corrente de gás e mecanismos de atomização. Particularmente, a penetração do jato é um dos fatores mais importantes na determinação da distribuição espacial das gotas. Pois, jatos com penetrações insuficientes ou excessivas podem conduzir a uma cobertura de garganta ruim, diminuindo assim a eficiência de coleta (Gonçalves *et al.*, 2003).

A penetração do jato é definida como a máxima distância transversal que o jato líquido penetra em uma corrente de gás antes de sua completa atomização (Adelberg, 1967). O mecanismo pelo qual o jato se rompe em gotas é muito complexo e a ruptura pode ocorrer de inúmeras formas. Isso depende de vários fatores, tais como: a geometria do orifício, a velocidade relativa entre o jato líquido e a corrente de gás no qual ele é injetado e as propriedades físicas do gás e do líquido (Raman, 1977 *apud* Viswanathan *et al.* 1983).

Em 1983 Viswanathan *et al.* propuseram um modelo semi-empírico para calcular o ponto de atomização de cada jato individual. De acordo com esse modelo, o jato pode ser caracterizado por duas distâncias importantes: a penetração do jato (ℓ^*) e a máxima penetração da linha central do jato (ℓ^{**}), como podem ser visto na Figura 2.7.

De acordo com Viswanathan *et al.* (1983), um jato transversal à uma corrente gasosa pode ser representado de forma bidimensional. Sendo que o jato segue uma trajetória curva, intacto, isto é, sem perder massa até certo ponto, de coordenadas z_0 e ℓ^* , no qual é atomizado. As gotas continuam se movendo em curva, em virtude do movimento do jato, criando uma impressão de que o próprio jato continua a existir. Entretanto, a velocidade das gotas na direção do eixo y está sempre diminuindo e eventualmente se torna nula. Por este motivo, a linha central do jato apresenta uma penetração transversal máxima (ℓ^{**}) (Gonçalves, 2000).

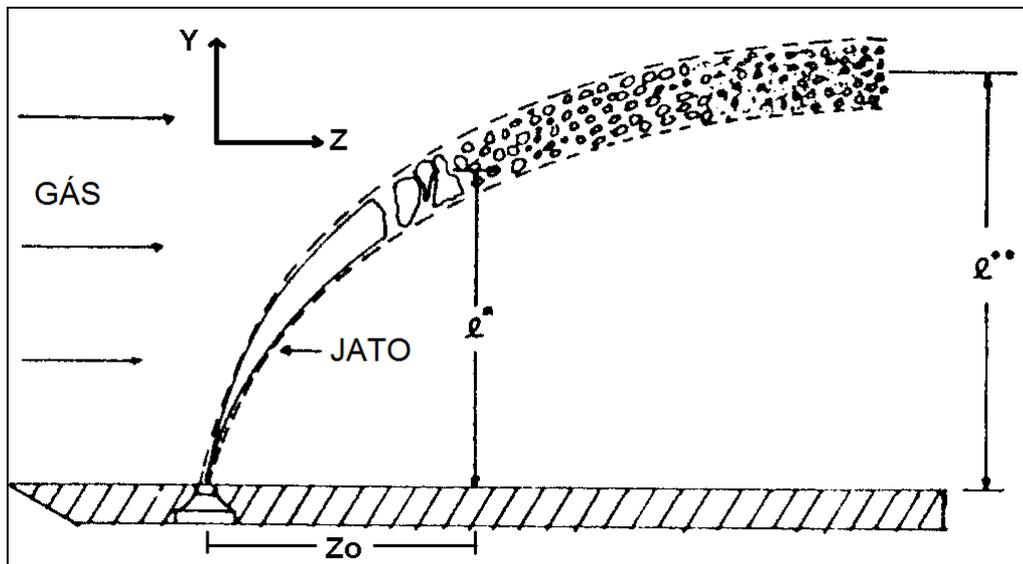


Figura 2.7 – Trajetória e penetração de um jato transversal segundo Viswanathan *et al.* (1983).

Esse modelo proposto por Viswanathan *et al.* (1983) foi desenvolvido baseado no estudo realizado por Adelberg (1967), o qual sugere que a atomização ocorre devido à formação e crescimento de ondas na superfície do jato. Adelberg (1967) em seu trabalho fez

uma distinção entre ondas de capilaridade e ondas de aceleração. Para o desenvolvimento do modelo proposto, os autores supuseram que as ondas formadas em lavadores Venturi eram ondas de aceleração e através de simplificações na teoria desenvolvida por Adelberg (1967) chegaram às seguintes expressões para a penetração do jato (ℓ^*), equação 2.1, e a penetração máxima da linha central do jato (ℓ^{**}), equação 2.2.

$$\frac{\ell^*}{d_o} = 0,075 \frac{\rho_l \cdot V_j}{\rho_g \cdot V_g} \quad (2.1)$$

$$\frac{\ell^{**}}{d_o} = 0,1145 \frac{\rho_l \cdot V_j}{\rho_g \cdot V_g} \quad (2.2)$$

$$V_j = \frac{4 \cdot Q_l}{\pi \cdot d_o^2 \cdot N_o} \quad (2.3)$$

Nessas equações V_j é a velocidade do jato líquido, V_g é a velocidade do gás, Q_l é a vazão total de líquido sendo introduzida no lavador Venturi, d_o é o diâmetro do orifício e N_o o número de orifícios de injeção do líquido.

Vários autores, tais como Taheri e Sheih, (1975); Fathikalajahi *et al.* (1995), Fathikalajahi *et al.* (1996); Viswanathan, (1997); Talaie, (1997); Ananthanarayana e Viswanathan (1998) e Ananthanarayana e Viswanathan (1999), desenvolveram modelos multidimensionais para lavadores Venturi, assumindo que a atomização do jato ocorre em um único ponto e em seguida as gotas se espalham. Assim, a maioria destes modelos utilizou a descrição proposta por Viswanathan *et al.* (1983).

Gonçalves *et al.* (2003) desenvolveram um modelo de resolução numérica o qual difere do modelo proposto por Viswanathan *et al.* (1983) principalmente porque ele não considera as hipóteses de um único ponto de atomização, e o fato de as ondas formadas serem unicamente de aceleração. De acordo com o critério dado por Adelberg (1967), as ondas presentes em jatos de lavadores Venturi cresceriam tipicamente como ondas capilares (Gonçalves *et al.*, 2003). Assim sendo, o modelo proposto por Gonçalves (2000), supõe que o único mecanismo atuando na atomização dos jatos em lavadores Venturi é o mecanismo relativo à formação e crescimento de ondas na superfície do jato, e que estas ondas crescem como ondas capilares.

Segundo o estudo realizado por Gonçalves *et al.* (2003), as ondas de superfície começam a existir logo após o jato deixar o orifício, mas necessitam de algum tempo para crescer em amplitude até um tamanho em que possam liberar ligamentos. Isto significa que o

jato percorre certa distância durante a qual a sua perda de massa é nula. Neste estudo a trajetória de um único jato transversal foi estimada a partir de um balanço de forças em um elemento infinitesimal, considerando que a única força atuando no jato é a força de arrasto.

O processo de atomização é um assunto de interesse não somente quando se trata de lavadores. O estudo da atomização de um jato líquido inserido perpendicularmente a uma corrente de ar vem sendo motivo de interesse de alguns pesquisadores por ser um processo importante em sistemas de propulsão e combustão (Kush e Schetz, 1973; Fuller *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 1997; Costa *et al.*, 2006).

Wu *et al.* (1997) realizaram o estudo da ruptura de um jato líquido transversal a uma corrente de ar com a injeção feita através de um orifício plano. Os autores dividiram a região de ruptura em: uma região de coluna, de gotas grandes, e uma região de spray. Esse processo de ruptura do jato líquido pode ser visto na Figura 2.8.

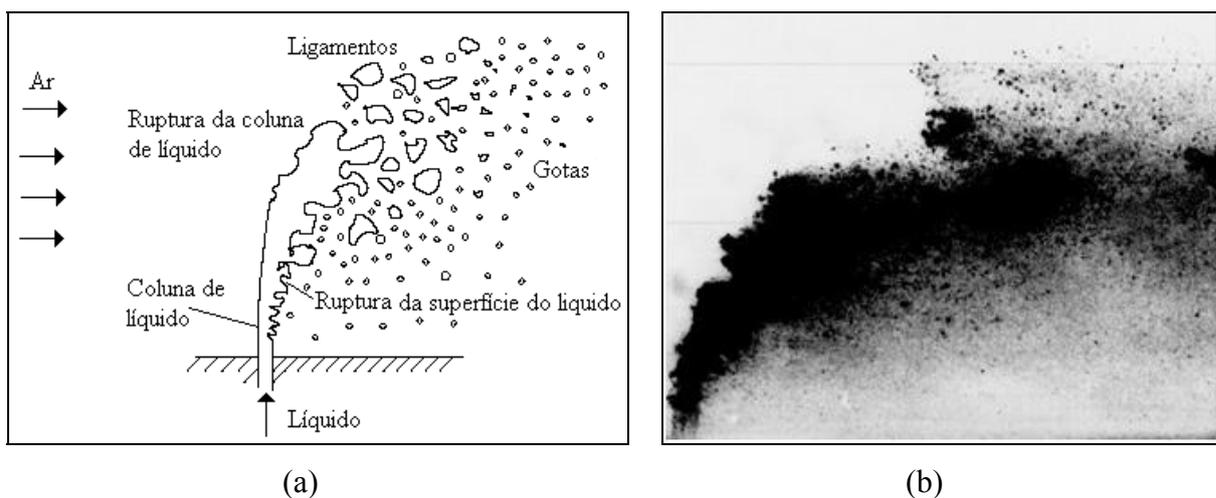


Figura 2.8 – Processo de ruptura de um jato líquido em uma corrente de ar transversal (a) Esquema demonstrando a ruptura de coluna e de superfície (Wu *et al.*, 1997) (b) Imagem com câmera de alta velocidade (Thawley, 2006)

Na Figura 2.8 (a) as gotas maiores são formadas na região de fratura da coluna podendo ser vistas na ponta da coluna de líquido. Subseqüentemente essas gotas maiores rompem-se em pequenas gotas. Simultaneamente, pequenas gotas podem ser formadas diretamente da superfície do jato. Dessa forma, a ruptura do jato líquido pode ocorrer devido ao mecanismo de ruptura da superfície do jato e do mecanismo de ruptura da coluna. As pequenas gotas são diretamente liberadas da superfície do jato líquido, devido ao atrito aerodinâmico. O mecanismo de ruptura de coluna refere-se ao crescimento de ondas de superfície até que a amplitude seja tão grande que ocorra a fratura do jato em ligamentos e

gotas maiores. Os autores observaram que o mecanismo de ruptura de superfície é o mecanismo dominante para altos valores da razão do fluxo de momento (q) e número de Weber (We). Já o mecanismo de ruptura da coluna é dominante para baixos valores da razão de fluxo de momento (q) ou números de Weber (We). Sendo que a razão de fluxo de momento é a razão de momento do jato sobre o momento do ar e é representada pela equação abaixo:

$$q = \frac{\rho_l V_j^2}{\rho_g V_g^2} \quad (2.4)$$

O número de Weber é a razão entre o momento do ar e a tensão superficial da fase líquida. O número de Weber é um parâmetro significativo freqüentemente usado para descrever a taxa de rompimento da coluna de líquido e é definido como:

$$We = \frac{\rho_g V_g^2 d_o}{\sigma_l} \quad (2.5)$$

Estudos realizados por Fuller *et al.* (2000) e por Costa *et al.* (2006) levaram em conta o efeito o ângulo de injeção do líquido e o efeito da turbulência do jato no processo de atomização. Os estudos foram realizados através da injeção de líquido em um corrente transversal de ar. No estudo desenvolvido por Fuller *et al.* (2000) os autores observaram que uma diminuição no ângulo de injeção mantendo q constante, resultou em uma redução das forças aerodinâmicas agindo na coluna de líquido. Quando o ângulo de injeção é pequeno, toda a coluna líquida torna-se alinhada a corrente de ar, e as condições de fluxo aproximam-se do caso de um jato paralelo movendo-se em um corrente de ar. Além disso, quando o ângulo é pequeno a velocidade do jato aproxima-se da velocidade da corrente de ar, o efeito das forças inerciais do líquido e a turbulência do líquido na ruptura da coluna mostra-se mais aparente.

Costa *et al.* (2006) trabalhando com velocidades subsônicas, bem menores que as estudadas por Fuller *et al.* (2000) também constataram a redução das forças de cisalhamento atuando na superfície da coluna de líquido com a diminuição do ângulo de injeção, ocasionando o desfavorecimento do processo de atomização.

2.7. Distribuições do tamanho de gotas

Um spray é geralmente considerado um sistema de gotas imersas em uma corrente gasosa de fase contínua. Exemplos deste tipo de aerossóis naturais incluem as chuvas, nevoeiros e chuveiros.

Muitos atomizadores utilizados na prática geram gotas na escala de pequenos micrometros até cerca de 500 μm . Devido à natureza heterogênea dos processos de atomização, os fios ou ligamentos formados pelos vários mecanismos de desintegração de jatos e fendas variam amplamente os diâmetros das gotas formadas. Os orifícios utilizados na prática para atomização não conseguem, portanto, produzir sprays com tamanho de gotas uniforme em muitas condições de operação, em vez disso, o spray pode ser considerado como um spectrum de tamanho de gotas distribuído sobre alguns valores característicos definidos arbitrariamente. Assim, além do tamanho característico das gotas, outro parâmetro de importância na definição de um spray é qual distribuição de tamanho de gotas ele possui.

2.7.1. Representação Gráfica da distribuição de tamanho de gotas

Uma boa figura da distribuição de tamanho de gotas pode ser obtida fazendo um histograma do tamanho das gotas. Cada ordenada representa o número de gotas as quais as dimensões caem entre os limites D_{\min} e D_{\max} . Pode-se também, representar o spray através do seu volume ou massa. Um típico histograma desse tipo pode ser visto na Figura 2.9.

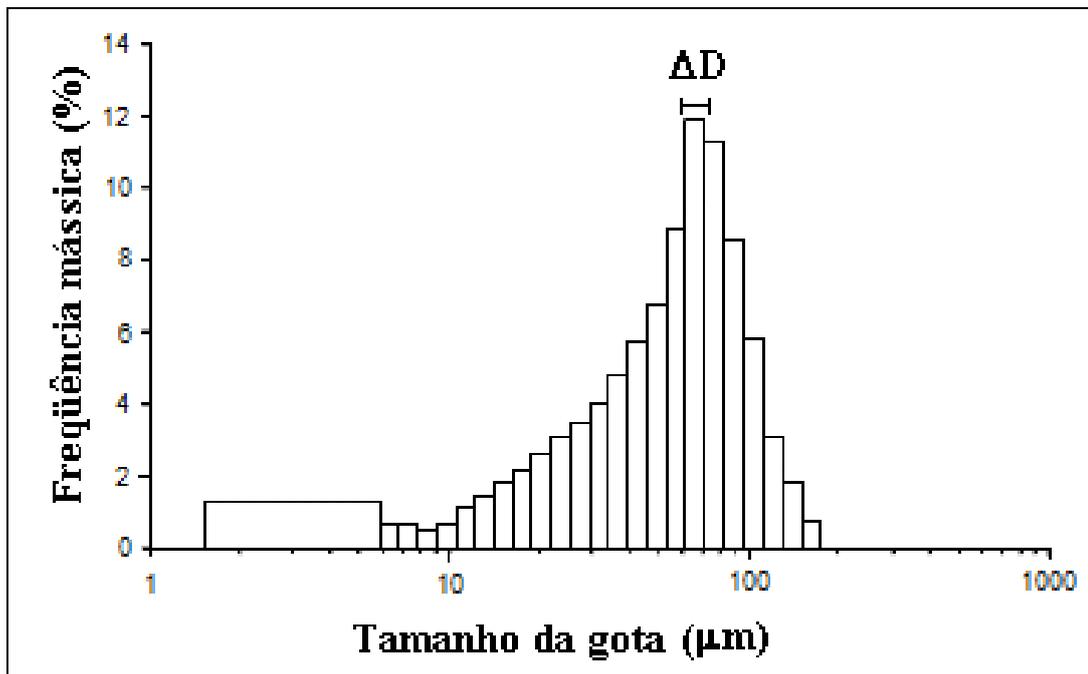


Figura 2.9 - Histograma típico de tamanho de gota.

Quando se faz o histograma em função do volume ou massa ao invés do número de gotas, a distribuição resultante é deslocada para a direita devido ao efeito do peso das gotas maiores. Os valores das ordenadas podem ser expressos como: o número de gotas com um dado diâmetro, o número relativo ou fração total, ou a fração por classe de tamanho.

Quando o valor de ΔD é muito pequeno, o histograma assume a forma de curva de frequência que pode ser considerada como uma característica do spray, já que ela é baseada em uma amostragem suficientemente grande. Além da representação da distribuição de tamanho de gotas através da frequência, também é informativo usar uma curva de distribuição cumulativa. Ela é essencialmente feita através da integral da curva de frequência e pode representar a porcentagem total de gotas em um spray, abaixo de um dado tamanho ou a porcentagem de área superficial ou volume de um spray contida em gotas abaixo de um dado tamanho.

2.7.2. Funções matemáticas de distribuição

Pelo fato da representação gráfica da distribuição de tamanho de gotas ser laboriosa e não facilmente relacionada a resultados experimentais, muitos pesquisadores tem tentado passá-la a expressões matemáticas nas quais parâmetros podem ser obtidos de um número limitado de medidas de tamanho de gotas. A expressão matemática adequada deverá ter os seguintes atributos:

- Proporcionar um ajuste satisfatório aos dados de tamanho de gotas.
- Permitir calcular facilmente os diâmetros de gotas representativos e outros parâmetros de interesse
- Promover meios de consolidar grandes quantidades de dados.

Na ausência de um modelo no qual construir a teoria de distribuição de tamanho de gotas, um número de funções foram propostas, baseadas em probabilidade ou considerações puramente empíricas, que permitam a representação matemática da distribuição do tamanho de gotas. Estas em geral incluem as distribuições normais, log-normal, Nukiyama-Tanasawa, Rosin-Rammler e limite superior. Como os mecanismos básicos envolvidos na atomização não podem ser claramente entendidos e nem todos dos dados de tamanho de gotas podem ser representados por uma única função de distribuição, torna-se usualmente necessário um teste das funções de distribuição para encontrar a que melhor se ajusta em um determinado dado experimental.

Dentre essas distribuições a mais utilizada em sprays é a função de Rosin-Rammler a dois parâmetros (Fernández Alonso *et al.*, 2001). Sua forma cumulativa pode ser expressa como:

$$1 - FC_v(D_d) = \exp\left[-\left(\frac{D_d}{X}\right)^n\right] \quad (2.6)$$

onde: FC_v = fração volumétrica (diâmetros menores que D_d)

n = parâmetro que prove uma medida da distribuição do tamanho de gota, quanto maior o valor de n mais uniforme é o spray.

X = diâmetro de gota tal que 63,2% da massa líquida total é formada por gotas de diâmetro menor que X .

2.7.3. Diâmetros característicos

Em muitos cálculos de transferência de massa e processos de escoamento é conveniente trabalhar somente com diâmetros médios ou característicos em vez da distribuição de tamanho de gotas. O conceito de diâmetro característico foi generalizado e sua notação formalizada por Mugele e Evans (1951, *apud* Azzopardi e Hewitt, 1997) e que podem ser vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tipos de diâmetros característicos.

Representação do diâmetro	Nome do diâmetro	Campo de aplicação
D_{10}	Comprimento	Comparação, evaporação
D_{20}	Área superfície	Controle da área Superficial (ex: absorção)
D_{30}	Volume	Volume de controle (ex: hidrologia)
D_{21}	Área Superfície - Comprimento	Adsorção
D_{31}	Volume-Comprimento	Evaporação, difusão molecular
D_{32}	Sauter (SMD)	Transferência de massa, atomização.
D_{43}	De Broukere ou Herdan	Equilíbrio de combustão

Fonte: AZZOPARDI e HEWITT, 1997

Supondo-se que uma distribuição dos tamanhos de gotas nas quais o número de gotas com um diâmetro maior que um valor específico d é N . Pode-se assim, definir um diâmetro médio característico D_{ab} tal que:

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^a (dN / dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^b (dN / dD) dD} \quad (2.7)$$

A equação 2.7 também pode ser escrita como:

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{1/(a-b)} \quad (2.8)$$

Onde i denota a escala de tamanho considerada, N_i é o número de gotas na escala de tamanho i e D_i é o diâmetro médio da escala de tamanho i .

Outras formas de diâmetros característicos podem ser usadas para representar uma determinada amostra, como por exemplo, o diâmetro mediano, que é o diâmetro tal que 50% da amostra está contida em diâmetros iguais ou menores. Existe também o diâmetro modal que representa o diâmetro que possui maior frequência na amostra.

No caso do estudo de tamanhos de gotas o diâmetro característico mais comumente utilizado é o diâmetro médio de Sauter (Volume/ Superfície) que pode ser escrito da seguinte forma:

$$D_{32} = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (2.9)$$

2.8. Métodos para medir tamanho de gotas

O problema de medir o tamanho de pequenas partículas tem sido encontrado em muitos ramos da engenharia e muitos métodos diferentes têm sido empregados com relativo sucesso. Entretanto, as dificuldades crescem quando se aplicam esses métodos para medir tamanhos de gotas em sprays. Essas dificuldades incluem o grande número de gotas em um spray, sua alta velocidade, a ampla escala de tamanho das gotas e a mudança no tamanho delas com o tempo devido à evaporação e a coalescência. Todos esses fatores devem ser levados em consideração na escolha da técnica para medir os seus tamanhos.

As técnicas para medir gotas de sprays devem possuir as seguintes características:

- Não criar distúrbios no processo de atomização ou padrão do spray. Cautela é requerida quando for usar um dispositivo intrusivo para medir tamanhos de gotas fluindo em uma corrente, uma vez que, as pequenas gotas seguem as linhas de corrente enquanto as gotas maiores tendem a migrar cruzando a linha de corrente.
- Ter a habilidade de medir tanto a distribuição espacial quanto temporal. A última é geralmente a preferida, mas muitas técnicas ópticas importantes fornecem somente a distribuição espacial.

- Fornecer amplas amostras de representatividade. Para obter uma razoável precisão da distribuição de tamanho de gotas medidas, a amostra deve conter no mínimo 5000 gotas.
- Ampla tolerância em possíveis variações no líquido e propriedades do gás.
- Fornecer métodos rápidos de amostragem e contagem. Aquisição de dados automatizada é necessário para acumular resultados dentro de segundos. O sistema de aquisição de dados deve ser hábil para produzir a distribuição do tamanho de gotas na forma de histogramas com vários diâmetros característicos.

Como é praticamente impossível juntar todos esses critérios em um único instrumento, as capacidades e limitações das várias técnicas de medidas disponíveis devem ser reconhecidas.

Os vários métodos empregados para medir o tamanho de gotas podem ser agrupados em 3 grandes categorias: mecânica, elétrica e óptica. A terceira categoria inclui sistemas ópticos que foram desenvolvidos recentemente e vem aumentando a sua escala de aplicação. Alguns desses instrumentos têm a capacidade de medir a velocidade da gota, a concentração bem como a distribuição de tamanho. Dentro desses 3 métodos tem-se:

1 – Mecânico

- Coleta de gotas em lâminas ou em células.
- Impactadores cascata.

2 – Elétrico

- Técnica do fio quente e fio elétrico carregado.

3- Óptico

- Imagem – Fotografia, Holografia.
- Não imagem – Contadores de partículas, espalhamento da dispersão de luz e analisador de partículas Malvern.

2.8.1.Método mecânico

Usualmente envolvem a captura de uma amostra de spray em uma superfície sólida ou em uma célula contendo um líquido especial. As gotas são então observadas, ou fotografadas, com a ajuda de um microscópio. O método é muito simples e tem muitas variações.

2.8.1.1. Coleta de gotas em lâminas

Nessa técnica uma superfície sólida, geralmente uma lâmina de vidro, é recoberto com um revestimento apropriado, o qual deve possuir uma estrutura fina e fazer com que sejam distintas as impressões criadas pelas pequenas gotas. Essas lâminas podem ser recobertas com um filme sólido tais como óxido de magnésio e fuligem ou com líquido tais como óleo mineral e óleo de silicone. No caso do revestimento sólido o impacto da gota produz uma cratera em que o tamanho é dependente do tamanho da gota, cujo valor pode ser obtido através de uma relação entre o tamanho da gota e a cratera formada no filme sólido (Azzopardi, 1979). Depois que a lâmina é exposta ao spray, os tamanhos de gotas impressos são medidos, algumas vezes pelo uso de um microscópio, mas mais usualmente com um analisador de imagem computacional. Esses tamanhos são então convertidos para o original tamanho da gota usando um fator de correção.

Alguns estudos realizados analisando essa técnica mostraram que ela possui uma tendência a superestimar o tamanho das gotas já que as gotas pequenas tendem a seguir a fase continua sobre as lâminas e por isso não se depositariam. O contrário ocorreria com as gotas maiores, neste caso a inércia causaria o impacto. (Taylor e Harmon, 1954; Azzopardi, 1979; Lefebvre, 1989; Kim e Marshal, 1971).

2.8.1.2. Coleta de gotas em células

Uma melhoria da técnica de coleta em lâminas revestidas é uma na qual as gotas são capturadas em um alvo onde elas ficam suspensas e podem ser contadas e medidas. Como alvo uma alternativa é coletar as gotas em uma célula contendo uma imersão líquida adequada. Esse método possui três vantagens em relação ao de coleta em lâminas:

- as gotas permanecem quase sempre perfeitamente esféricas, contanto que a densidade da imersão líquida seja levemente menor que o líquido do spray;
- a evaporação é prevenida,
- os verdadeiros tamanhos das gotas são obtidos e podem ser medidos diretamente, desde que não ocorra divisão da gota no choque com a imersão líquida.

Uma limitação do método é a de que ele não pode ser aplicado a sprays densos devido ao risco de desintegração das gotas maiores no impacto com a imersão líquida. No entanto, o problema da quebra da gota pode ser amenizado pela escolha de uma imersão líquida de baixa viscosidade e tensão superficial. Outro problema com o método de

amostragem é o da coalescência da gota, esse fenômeno freqüentemente não é notado porque a sua detecção é muito difícil. A saída encontrada para amenizar esse fenômeno é o mesmo que o usado para quebra da gota.

2.8.1.3. Impactadores cascata

Esse método é baseado no princípio de que uma gota grande movendo-se em alta velocidade, por causa da sua inércia, baterá em um possível obstáculo localizado em sua trajetória, enquanto as gotas pequenas fluindo abaixo de certas velocidades seguirão o fluxo contornando o obstáculo. Assim uma amostra de spray, sobre investigação, é lançada através de um orifício, onde ele encontra uma película. A película geralmente é recoberta com uma mistura de carbono e oxido de magnésio para reter as gotas. As gotas menores batem na lâmina enquanto as gotas menores seguem o fluxo de ar.

2.8.2.Métodos elétricos

Métodos elétricos geralmente contam com a detecção e análise de pulsos elétricos produzidos pelas gotas para calcular a distribuição de tamanho.

2.8.2.1.Técnica do fio carregado

Essa técnica opera com o princípio de que quando a gota colide com um fio carregado eletricamente ela remove um montante de cargas que depende do seu tamanho. Isso permite que os tamanhos das gotas sejam obtidos pela conversão da transferência de carga dentro de uma voltagem de pulso mensurável.

As limitações da técnica do fio carregado parecem depender de uma combinação da condutividade elétrica do líquido e do fluxo das gotas. Líquidos de baixa condutividade produzem pulsos de longa duração, os quais aumentam a probabilidade de gerar erros devido à sucessiva colisão havendo superposição de uma sobre as outras. Esse problema parece limitar o uso da técnica a sprays diluídos de líquidos com alta condutividade.

2.8.2.2.Técnica do fio quente

Quando uma gota líquida liga-se a um fio quente isso causa resfriamento do fio devido à evaporação da gota. Esse fenômeno pode ser usado para obter tamanhos e concentrações de gotas presentes em uma corrente gasosa. Basicamente o dispositivo empregado é um anemômetro de fio quente à temperatura constante. Quando não há a presença de nenhuma gota a resistência elétrica do fio é alta e uniforme ao longo do seu comprimento. Quando uma gota liga-se ao fio, o resfriamento local causado pela gota reduz a

resistência proporcionalmente ao tamanho da gota. Essa redução na resistência é manifestada como uma voltagem através do fio. A corrente elétrica constante fornecida para o fio subsequente evapora a gota, deixando o dispositivo pronto para receber outra gota.

2.8.3. Métodos ópticos

Os métodos ópticos podem ser divididos em dois tipos: os que geram imagens e os que não geram imagens. O primeiro inclui fotografias e holografias e têm a vantagem de permitirem que as gotas sejam “vistas” como elas existem no ponto e tempo onde o conhecimento de seu tamanho é requerido. Outra vantagem é de que os erros que podem ser gerados da coalescência ou evaporação das gotas após a amostragem podem ser eliminados.

Os métodos de não imagem podem ser subdivididos em duas classes, aqueles que contam e medem gotas individuais e aqueles que medem um grande número de gotas simultaneamente.

Uma variedade de métodos ópticos tem sido empregada para análises de sprays. Cada método tem suas vantagens e limitações, mas todos eles têm o importante atributo de permitir que a medida de tamanho seja realizada sem a inserção de um investigador físico dentro do spray.

2.8.3.1. Análise fotográfica em alta velocidade

A fotografia é um método preciso e de baixo custo para a realização de medidas de tamanho de gotas e velocidade em sprays. Basicamente consiste em tirar uma fotografia com um pulso de luz de intensidade adequada e de curta duração para produzir uma imagem nítida.

Lâmpadas de vapor de mercúrio, flashes de luz e pulsos a laser são geralmente usados para criar uma fonte de luz de alta intensidade e curta duração.

O método apresenta problemas apesar de ser exato. Dentre os problemas a maior dificuldade é a análise das imagens fotografadas as quais estão sempre vinculadas ao envolvimento humano. Medidas manuais são tediosas e consomem tempo, sujeitando o operador a fadiga e erros. Analisadores automáticos de imagens também são de responsabilidade do operador, o qual pode decidir quais gotas devem ser focadas. Outro problema é o seu uso em sprays de alta densidade por tornar difícil a captura da imagem das gotas com nitidez, devido à sobreposição. A análise fotográfica também pode ser usada para obter informações a respeito da velocidade da gota. Se dois pulsos são gerados sucessivamente rápido uma imagem dupla é obtida de uma única gota. No plano fotográfico a

velocidade da gota pode ser determinada pela distância percorrida pela gota e dividida pelo intervalo de tempo entre os dois pulsos.

2.8.3.2. *Contadores de partículas individuais (não imagem)*

Como o próprio nome diz os contadores de partículas medem partículas ou gotas que passam através de um feixe de laser de forma individual. Embora no passado esse tipo de técnica tenha sido restrita a sprays diluídos, o mais recente uso de amplos ângulos fora do eixo de detecção do espalhamento da luz tem permitido que esses instrumentos sejam usados em sprays relativamente densos. Contadores de partículas têm potencial de medir tanto o tamanho quanto a sua velocidade. As distribuições encontradas são baseadas nas medidas de gotas individualmente. Possuem também a capacidade de realizar medidas não intrusivas com alta resolução espacial e sobre ampla escala de tamanho.

- **Anemômetro Laser Doppler**

Na técnica anemômetro laser Doppler (LDA) dois feixes encontrando-se em um ângulo no fluido criam uma "franja" padrão dentro do fluido na região onde os feixes se cruzam. Uma partícula ou gota passando através dessa região produz a luz que é detectada por um fotodetector de uma lente de recepção. A frequência resultante da saída do fotodetector depende da velocidade da partícula e da franja ocupada. Claramente, a principal aplicação do LDA é a medida de velocidades locais no fluido através de partículas pequenas o bastante para seguir a locomoção do mesmo. Entretanto, a técnica LDA pode ser usada para o estudo do comportamento de partículas grandes.

Esse equipamento foi desenvolvido devido ao contínuo esforço dos pesquisadores, na década de 70, em produzir um instrumento capaz de medir a velocidade de gotas ou partículas e simultaneamente o seu diâmetro. Para obter a indicação do tamanho de partícula usando o LDA deve-se medir a amplitude da frequência do sinal. Esta amplitude aumenta com o aumento do tamanho da partícula. Um dos problemas da técnica é que para realizar uma medida exata deve-se ter a certeza de que a partícula está passando centralmente através do volume de dispersão, pois se as partículas grandes passarem através da borda do volume pode-se ter uma pequena amplitude a qual não representa realmente o tamanho da partícula.

- **Técnicas de difração de luz**

As propriedades ópticas em média são caracterizadas pelos seus índices de refração. Na aplicação dessas técnicas quando ocorre uma pequena variação no índice de refração

devido à presença de partículas, parte da radiação será espalhada em todas as direções enquanto outra parte é transmitida sem perturbação. Dessa forma as propriedades de espalhamento de luz podem ser usadas para indicar a distribuição do tamanho de gotas, desde que, o número de gotas sobre observação seja amplo o suficiente para garantir uma amostragem representativa.

Técnica de difração a laser

A difração é o principal mecanismo de dispersão de luz para medição de gotas. Esta técnica aplica-se para medir gotas de tamanhos entre $5\mu\text{m}$ e várias centenas de μm . As medidas de dispersão são feitas através da passagem de um feixe de luz, como mostrado na Figura 2.10. Além do campo da partícula, a luz passa através de uma lente que focaliza o feixe original sobre um ponto no plano focal a uma distância f da lente. A luz difratada em um ângulo θ de alguma posição dentro do campo da partícula ou gota passa através da lente e choca-se no plano focal a uma distância $r = \theta f$ do eixo, sendo que, partículas ou gotas de mesmo tamanho difratam a luz com um mesmo ângulo e os diversos raios difratados convergem para um mesmo ponto no plano focal, independente da posição da partícula ou gota no spray.

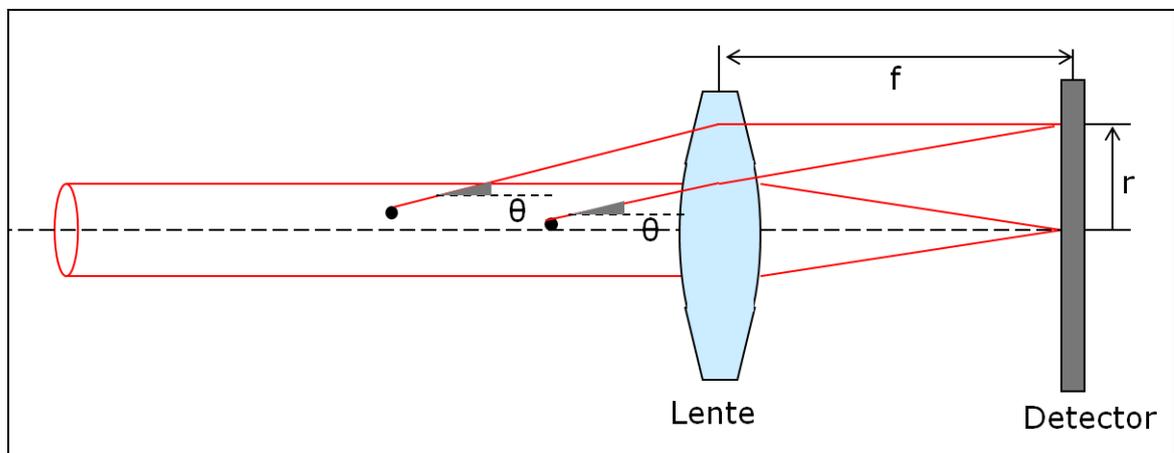


Figura 2.10 - Difração de um feixe de luz por um corrente de partículas.

A distribuição radial de intensidade pode ser determinada através de uma série de detectores com a forma de anéis anulares situados no plano focal. A vantagem dos anéis anulares é que eles proporcionam uma maior área sobre a qual a luz é coletada, ampliando assim, a escala de intensidade de luz.

Para interpretar a distribuição de intensidade é necessário assumir alguma forma funcional para a distribuição do tamanho de gotas, como, por exemplo, a distribuição de Rosin-Rammler.

A técnica de difração como descrita acima foi originalmente desenvolvida por Swithenbank *et al.* em 1976, baseando-se na teoria de difração de Fraunhofer. Atualmente um instrumento baseado nesta técnica está disponível comercialmente pela Malvern Instruments Ltd da Inglaterra. Este equipamento vem sendo amplamente utilizado em análises de sprays (Azzopardi e Hewitt, 1997).

Analizador de partículas Malvern Spraytec

Embora muitas técnicas não intrusivas tenham sido desenvolvidas para medir a distribuição de tamanho de gotas, a mais amplamente usada é o medidor de partículas da Malvern, o qual utiliza a técnica de difração de um laser. Para realizar medidas rápidas das características de um spray, ele é um dos métodos mais efetivos, simples e seguro que está disponível comercialmente. Ele é de fácil uso e muito pouco conhecimento de seus princípios de funcionamento é requerido para sua operação. A Figura 2.11 mostra o esquema do Malvern Spraytec.

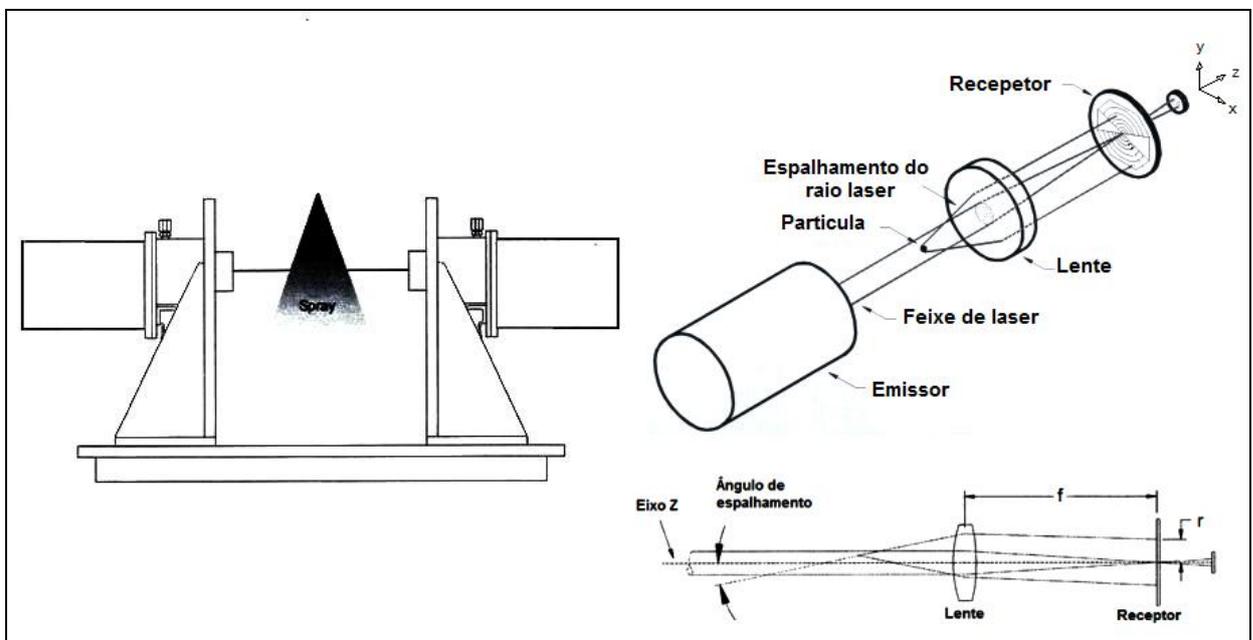


Figura 2.11 - Esquema do Malvern Spraytec.

Uma das maiores vantagens do sistema é a velocidade na qual os dados podem ser acumulados e analisados, permitindo completa caracterização de um atomizador sobre toda sua escala de operação, dentro de pouco tempo. Outro importante atributo é que o parâmetro

de difração gerado pelas gotas é independente da posição da gota no feixe de luz. Isso permite que as medidas da distribuição de tamanhos sejam feitas com gotas movendo-se em alta velocidade.

Para realizar medidas exatas, experiências têm mostrado que um bom alinhamento do sistema óptico do Malvern é essencial. Deve-se também escolher o correto comprimento focal das lentes de acordo com a escala de medida da gota a ser medida. A Tabela 2.2 mostra a faixa de diâmetro medido para cada comprimento focal da lente.

Tabela 2.2 – Faixa de diâmetro para cada comprimento focal de lente

Lente (mm)	Faixa de tamanho de gota medida $D_v(50)$ μm
100	2,5 – 125
200	5,0 – 250
450	12 - 500

Fonte: Manual do Malvern Spraytec

É também importante alinhar o feixe de laser perpendicularmente ao eixo do spray em uma distância adequada da corrente de saída do atomizador. Os dados podem ser analisados em termos de um histograma ou distribuição na forma de uma função normal, lognormal, Rosin Rammler ou modelo independente fornecido pelo equipamento.

Precisão do medidor de partículas Malvern Spraytec

A teoria de difração de Fraunhofer, na qual o instrumento é baseado, aplica-se somente a gotas nas quais o diâmetro é muito maior que o comprimento de onda da luz incidente. Dessa forma resultados imprecisos serão gerados quando, por exemplo, medidas de tamanho de gotas forem realizadas abaixo de 5 μm usando a lente receptora de 200 mm. Dessa forma, a escolha da lente apropriada é importante para abranger a escala desejada. Para escolher adequadamente a lente sprays utilizados na prática podem ser analisados sem dificuldade. O histograma fornecido pelo equipamento deve sempre exibir um pico definido. Quando nenhum pico está evidente isso deve significar que a maioria do número de gotas encontra-se fora da escala de capacidade medida, dessa forma, o equipamento não pode interpretar apropriadamente o padrão de difração observado.

Outros cuidados devem ser tomados em relação à aquisição dos dados referentes a fenômenos como a múltipla difração e o *vignetting*.

- *Vignetting*: Na realização de medidas em sprays é necessário limitar a distância máxima entre o spray e os receptores ópticos. Essa distância máxima depende do

comprimento focal e do diâmetro da lente receptora. Excedendo essa distância os raios difratados com os maiores ângulos (correspondente as partículas menores), não atingirão a lente e dessa forma a distribuição obtida não será representativa do spray. Esse fenômeno é conhecido como *vignetting*. Dodge (1984, apud Lefebvre, 1989) estudou esse problema e desenvolveu a seguinte expressão para calcular a distancia máxima permitida (x):

$$x = f \left(\frac{D_1 - D_b}{D_{dec}} \right) \quad (2.10)$$

Onde: f = comprimento da lente focal

D_1 = diâmetro da lente

D_b = diâmetro do feixe de laser

D_{dec} = diâmetro do detector.

A Tabela 2.3 apresenta alguns valores da distância de trabalho máxima permitida para cada lente, calculados á partir da equação 2.10.

Tabela 2.3- Distância máxima permitida para cada comprimento focal das lentes.

Lente (mm)	Distância máxima de trabalho (mm)
100	150
200	300
450	675

Fonte: Manual do Malvern Spraytec

Difração múltipla: Quando a densidade do spray é alta, a luz difratada por uma gota pode ser difratada por uma segunda gota antes de alcançar o detector. Já que a teoria em que se baseiam os instrumentos a laser assume a difração gerada por uma única gota, a difração múltipla introduz erros na distribuição de tamanho computada.

Quando mede tamanho de gotas em sprays, o instrumento Malvern indica a porcentagem de luz removida da direção original, ocasionada devido à difração, absorção ou reflexão devido à presença do spray. Dessa forma, a introdução do spray faz com que a energia medida no ponto central do detector diminua enquanto a energia medida nos anéis aumente. Essa fração de energia perdida devido à introdução do spray é chamada de obscurecimento e pode ser obtida através da equação 2.11.

$$Obsc = 1 - \frac{E_{bs}}{E_{ds}} \quad (2.11)$$

Onde: E_{bs} = a energia medida no ponto central sem a presença do spray

E_{ds} = a energia medida no ponto central com a presença do spray

A maior consequência da difração múltipla é a distorção do padrão de difração para ângulos maiores. Quando o dado distorcido é processado, ele indica uma distribuição de tamanho de gotas mais extensa e com tamanhos médios menores que o real. O problema da difração múltipla torna-se significativo quando mais de 50% do obscurecimento da luz é difratado pelas gotas. Entretanto, medidas já podem ser feitas em sprays densos onde o obscurecimento é maior que 95%, desde que uma correção seja aplicada nos resultados.

Desde 1984, muitos experimentos ou estudos teóricos têm considerado o problema da difração múltipla em medidas da difração em laser. Dodge (1984, *apud* Triballier *et al.*, 2003) realizou uma investigação experimental da influencia do comprimento do spray nas medidas de distribuição de tamanho de gotas com o equipamento Malvern. Nesse trabalho foi desenvolvido um fator de correção para o diâmetro médio de Sauter que pode ser visto na equação 2.12.

$$C_F = \frac{D_{32}}{D'_{32}} \quad (2.12)$$

onde: D_{32} é diâmetro médio de Sauter medido e D'_{32} é o diâmetro médio de Sauter real.

O coeficiente C_F é dado por:

$$C_F = 1 - a \exp(-bT) \exp(-cD'_{32}) \quad (2.13)$$

em que: T é a transmissão ($T=1-Obse$) e as constantes a, b e c são iguais a: $a = 0,9456$; $b = 3,811$ e $c = 0,0204$.

A distribuição de tamanho de gotas foi calculada com o modelo de Rosin Rammler e a escala de diâmetros de Sauter foi de $19,2 \mu\text{m}$ e $53 \mu\text{m}$.

Em 1985 Felton *et al.* (*apud* Triballier *et al.*, 2003) desenvolveu um modelo teórico para a difração múltipla. Nesse modelo o caminho óptico da luz é dividido em uma seqüência de fatias de igual extensão e o efeito da difração múltipla no padrão de difração é avaliado. Previsões baseadas nesse modelo foram comparadas com resultados experimentais obtidos usando suspensões densas de esferas de vidro de distribuição granulométrica conhecida (variando de 5 a $105 \mu\text{m}$) e que seguiam a função estatística de Rosin-Rammler. Excelente concordância foi encontrada e foram propostas as seguintes correlações empíricas para correção dos valores medidos dos parâmetros X_{ros} e n_{ros} da função de Rosin-Rammler, a partir dos valores de n_{ros} e obscurecimento medidos.

$$X_{ros,corrigido} = X_{ros,medido} C_{Xros} \quad (2.14)$$

$$n_{ros,corrigido} = n_{ros,medido} C_{nros} \quad (2.15)$$

Onde C_{Xros} e C_{nros} são, respectivamente parâmetros de correção propostos para os valores de X_{ros} e n_{ros} :

$$C_{Xros} = 1 + (0,036 + 0,4947Obsc^{8,997})n_{ros,medido}^{(1,9-3,437Obsc)} \quad (2.16)$$

$$C_{nros} = 1 + (0,035 + 0,1099Obsc^{8,65})n_{ros,medido}^{(0,35+1,45Obsc)} \quad (2.17)$$

Experimento similar foi realizado por Gülder (1987, 1990, *apud* Triballier *et al.*, 2003) considerando uma distribuição multi-modal e o uso do modelo independente fornecido pelo equipamento da Malvern. Vários fatores de correção foram obtidos das medidas e uma correlação empírica para o diâmetro médio de Sauter foi desenvolvida e é dada por:

$$C_F = \frac{D_{32}}{D'_{32}} = 1,35 \exp(F_1 + F_2) \quad (2.18)$$

Onde D_{32} é o diâmetro médio de Sauter medido, D'_{32} é o valor real desse diâmetro e F_1 e F_2 são dados por:

$$F_1 = 0,1184 \left(\frac{D_{32}}{100} \right)^2 + 13,122 \frac{Obs}{D_{32}} - 5,7474 \frac{Obsc}{\sqrt{D_{32}}} \quad (2.19)$$

$$F_2 = 2,2389Obsc^8 - 2,6077Obsc^9 \quad (2.20)$$

Essa equação de correção é válida para as seguintes escalas: $10\mu m < D_{32} < 100\mu m$ e $0,5 < Obsc < 0,98$.

Atualmente a ultima geração de medidor de gotas da Malvern, o Spraytec, leva em conta a difração múltipla da luz. O procedimento de inversão matemático do Malvern Spraytec contém duas grandes diferenças comparadas com as versões prévias do equipamento. A primeira é que o Malvern Spraytec emprega a teoria de Lorenz-Mie para calcular a contribuição da distribuição angular da luz refletida através de pequenas gotas. Isso melhora consideravelmente o comportamento do instrumento quando for medir sprays finos. Segundo, no procedimento de inversão matemática do Spraytec está incluído um algoritmo de difração múltipla patenteada que permite realizar medidas bem sucedidas em condições de altas concentrações com obscurecimento tão alto quanto 95%, ou seja, 5% de transmissão.

Esse equipamento é hoje utilizado na investigação experimental onde a distribuição de tamanho de gotas tem que ser obtida em sprays densos (Triballier *et al.*, 2003).

2.9. Estudos realizados do tamanho de gotas no processo de atomização

O tamanho das gotas é um dos mais importantes parâmetros que afetam o desempenho, cálculos e modelagem de um lavador Venturi (Fathikalajahi *et al.*, 1996; Bayvel, 1982; Muir e Kuye, 1986).

O estudo sobre a distribuição do tamanho de gotas realizado por Nukiyama e Tanasawa (1938) em atomizadores pneumáticos é um dos mais aplicados aos lavadores Venturi. Nesse estudo, as gotas foram formadas através de um jato líquido, injetado paralelamente a uma corrente gasosa (de ar) de alta velocidade através de orifícios especiais de 0,34 a 2 mm de diâmetro. As velocidades de gás variavam de 73 a 230 m/s e as razões L/G entre 0,08 e 1,0 L/m³. Os líquidos utilizados no experimento foram variados a fim de estudar a influência da densidade, viscosidade e tensão superficial.

A técnica utilizada para medir o tamanho das gotas foi a de impacto, isto é, as gotas eram capturadas em lâminas para microscópios e em seguida elas eram contadas e medidas manualmente. As correlações propostas por Nukiyama e Tanasawa (1938) para a estimativa do tamanho de gota e sua distribuição foram às seguintes:

Para a estimativa do tamanho de gota:

$$D_{32} = \frac{0,585}{(V_g - V_d)} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l}} + 1,683 \times 10^{-3} \left(\frac{\mu_l}{\sqrt{\sigma \rho_l}} \right)^{0,45} \left(\frac{1000 Q_l}{Q_g} \right)^{1,5} \quad (2.21)$$

em que: V_g é a velocidade do gás, V_d a velocidade da gota, Q_l a vazão volumétrica de líquido em litros e Q_g a vazão volumétrica de gás em m³.

E para a distribuição de tamanhos:

$$FDP_N(D_d) = \frac{b_1 b_2^{3/b_1}}{\Gamma(3/b_1)} D_d^2 \exp(-b_2 D_d^{b_1}) \quad (2.22)$$

em que: D_d é o diâmetro da gota, Γ é a função gama e b_1 e b_2 são parâmetros da equação que afetam a dispersão e o valor central da representação.

A correlação encontrada por Nukiyama e Tanasawa (1938) para estimar o tamanho de gotas em lavadores Venturi é a mais usada, entretanto ela também é criticada devido ao fato do método utilizado apresentar uma tendência em superestimar o tamanho de gotas em

sprays, já que as gotas menores desviam com maior facilidade da lâmina coletora. Além do fato das condições operacionais em que a correlação foi desenvolvida não serem as típicas de um lavador Venturi comercial, já que utilizou-se velocidades relativamente altas e razões L/G baixas (Boll *et al.*, 1974).

Ingebo e Foster (1957, *apud* Roberts e Hill, 1981) fizeram um estudo fotográfico da quebra de jatos, com líquidos injetados transversalmente a uma corrente de ar. Os autores correlacionaram o diâmetro médio volumétrico D_{30} com a seguinte equação:

$$D_{30} = 3,9d_o \left(\frac{We_g \cdot Re_l \cdot V_g}{V_j} \right)^{-0,25} \quad (2.23)$$

A equação desenvolvida pelos autores sugere que o diâmetro das gotas depende do diâmetro do orifício de atomização.

Em 1971 Kim e Marshall realizaram um estudo da distribuição de tamanho de gotas em atomizadores pneumáticos e desenvolveram uma equação semelhante à proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938) em que o diâmetro médio de Sauter foi estimado como sendo proporcional a distribuição média mássica:

$$D_{32} = 0,83 \cdot D_m \quad (2.24)$$

Sendo D_m o diâmetro médio mássico em μm expresso como:

$$D_m = \frac{\sigma^{0,41} \mu_l^{0,32}}{(V_{rel}^2 \rho_g)^{0,57} A^{0,36} \rho_l^{0,16}} + 228,56 \left(\frac{\mu_l^2}{\rho_l \sigma} \right)^{0,17} \frac{1}{V_{rel}^{0,54}} \left(\frac{W_g}{W_l} \right)^m \quad (2.25)$$

onde: V_{rel} é a velocidade do relativa ar-líquido, A é a área de atomização referente a corrente de ar, W_g e W_l representam as vazões mássicas de gás e líquido respectivamente. O valor de $m = -1$; se $W_g/W_l < 3$ e $m = -0,5$; se $W_g/W_l > 3$.

Nesse experimento, os líquidos atomizados foram cera derretida e misturas de polietileno derretido de várias composições para obter viscosidades diferentes. Ao atomizar os líquidos esses se tornavam sólidos, possibilitando dessa forma, a medida das gotas. As técnicas utilizadas para medir o tamanho das gotas foram à contagem por microscópio e o peneiramento.

Parker e Cheong (1973) utilizaram um método semelhante ao utilizado por Nukiyama e Tanasawa (1938), nesse estudo os autores utilizaram uma lâmina recoberta com óxido de magnésio para medir a distribuição de tamanho de gotas em um lavador Venturi.

Foram utilizados dois sistemas de injeção, filme e um único jato paralelo axial. A velocidade com que foram realizadas as medições foi de 100m/s de ar na garganta e baixas vazões de líquido. Para estimar o tamanho das gotas foi posicionada ao final do difusor uma lâmina revestida com óxido de magnésio e com a colisão das gotas na lâmina ocorria a formação de crateras. Funções matemáticas foram utilizadas para corrigir os resultados em função da eficiência de coleta da lâmina, da evaporação sofrida pelas gotas e outros fatores. Com a correção dos dados os autores concluíram que a grande fração das gotas era menor que 20 μm e a inexistência de gotas maiores que 200 μm , além da independência do tamanho de gota em relação ao sistema de injeção.

Em 1974 Boll *et al.* realizaram medidas do tamanho de gotas em lavadores Venturi de grande escala (Venturi comercial) a fim de comparar os resultados com valores obtidos pela correlação de Nukiyama e Tanasawa (1938), a qual foi desenvolvida em condições operacionais atípicas para lavadores. O lavador Venturi utilizado possui seção retangular com área da garganta de 0,1 m^2 e o método utilizado por Boll *et al.* (1974) para realização das medidas foi o de atenuação de luz monocromática. Este método fornece apenas um valor médio dos diâmetros apresentados na amostra e não uma distribuição de tamanhos. O erro estimado pelos autores foi de $\pm 15\%$. Para converter os sinais referentes a quantidades de energia luminosa em tamanho de gota é necessário conhecer a velocidade das gotas, para isso, Boll *et al.* utilizaram como ponto de medida uma posição no difusor no qual a velocidade do gás e das gotas deveriam ser aproximadamente iguais. As condições de operação referentes à vazão de gás e líquido foram dentro de uma faixa normal (0,6; 1,2 e 2,4 L/m^3). O líquido foi injetado na forma de jatos transversais através de 8 orifícios localizados nas laterais da seção convergente (4 de cada lado) e as velocidades de gás na garganta foram em torno de 30, 50 e 100 m/s. Os resultados obtidos mostraram que a correlação proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938) proporcionou bons resultados para as velocidades em torno de 50 m/s na garganta, enquanto para a velocidade em torno de 100 m/s esta correlação previu tamanhos de gotas cerca de 48% maiores. Para velocidades menores (em torno de 30 m/s) obteve-se uma previsão cerca de 25% menor. Concluindo-se dessa forma que a correlação proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938) possui uma faixa de aplicação limitada. Os autores propuseram uma correlação empírica para o diâmetro médio de Sauter:

$$D_{32} = \frac{4,22 \times 10^{-2} + 5,77 \times 10^{-3} \left(\frac{1000Q_l}{Q_g} \right)^{1,932}}{V_g^{1,602}} \quad (2.26)$$

Nas condições operacionais empregadas nos testes feitos por Boll *et al.* (1974) os valores dos diâmetros encontrados ficaram entre 50 e 400 μm . Os autores também verificaram que a distribuição do líquido não é uniforme na seção transversal do lavador, pois para velocidades maiores observou-se uma tendência do líquido em falhar ao penetrar a linha central do lavador. E em velocidades menores essa tendência diminui aumentando a distribuição de líquido no centro do lavador.

Atkinson e Strauss (1978) utilizaram um método fotográfico para estudar o efeito da tensão superficial nas gotas formadas em lavadores Venturi. Para realizar esse estudo os autores utilizaram como líquidos de injeção a água, água mais detergente e água mais propanol. Os autores trabalharam em condições que não são típicas desse equipamento com velocidade do gás de 50 m/s e razões L/G baixas (entre 0,15 e 0,25 L/m³). O sistema de injeção foi feito através de dois jatos localizados logo na entrada da garganta. O lavador Venturi utilizado possuía seção retangular com área da garganta de 0,00064 m². Os tamanhos de gotas encontrados para a água, em torno de 68 μm , foram comparados com os obtidos pelas correlações de Nukiyama e Tanasawa (1938) e Boll *et al.* (1974). Os autores verificaram que quando a correlação de Nukiyama e Tanasawa foi aplicada nas condições operacionais do experimento os diâmetros médios de Sauter calculados foram muito maiores que os medidos, cerca de 43%. No entanto utilizando a correlação proposta por Boll *et al.* (1974) os valores obtidos para a água, foram somente 14% acima dos medidos. Assim sendo, os autores concluíram que a equação proposta por Boll *et al.* (1974) parecia, neste estudo, ser a mais adequada para prever diâmetro de gotas em lavadores Venturi.

Bayvel (1980, *apud* Gonçalves, 2000), empregando uma técnica de difração de laser para medir o tamanho de gotas, também chegou a conclusão de que a faixa de aplicação da correlação de Nukiyama e Tanasawa (1938) é limitada. A água foi inserida no Venturi no começo da garganta com um jato paralelo ao gás (injeção co-axial). Bayvel (1980, *apud* Fernández Alonso *et al.* 2001) trabalhou com diferentes comprimentos de garganta e mediu o tamanho de gotas em diferentes posições ao longo do Venturi. Nenhuma influência da razão L/G foi encontrada e foram medidos tamanhos de gotas menores que os previstos pela correlação de Nukiyama e Tanasawa (1938). A distribuição do tamanho de gota foi descrita por uma função normal, mas as constantes dessa equação não foram relatadas. O autor notou que os tamanhos das gotas eram maiores no final do difusor que na injeção.

Robert e Hill (1981) realizaram um estudo da atomização em um lavador Venturi retangular. O líquido foi injetado através de um orifício e o estudo variou o bocal de injeção

do líquido, a vazão de líquido e a velocidade do gás. Através das imagens os autores visualizaram tamanhos de gotas nas faixas entre 170 a 1500 μm .

Em 1984 Azzopardi e Govan realizaram um estudo em que o líquido foi injetado na forma de filme através de parede porosa e a injeção foi realizada antes do início da seção convergente. Os autores propuseram um modelo matemático para lavadores Venturi no qual o tamanho das gotas formadas na direção axial (z), dependeria do número de Weber e da quantidade de gotas que já existiriam naquele momento do escoamento:

$$\frac{D_{d,z}}{l_A} = \frac{15,4}{We^{0,58}} + \frac{3,5\rho_l W_{d,x}}{\rho_g W_g} \quad (2.27)$$

onde: $D_{d,z}$ é o diâmetro da gota ao longo de z e os valores de l_A e do número de Weber são calculados por:

$$l_A = \left(\frac{\sigma}{\rho_l g} \right)^{0,5} \quad (2.28)$$

$$We = \frac{V_g^2 l_A \rho_l}{\sigma} \quad (2.29)$$

Leith *et al.*(1985) apresentaram dados de tamanho de gotas utilizando a técnica fotográfica em um lavador Venturi de seção circular com 54 mm de diâmetro de garganta e 51 mm de comprimento. A injeção do líquido foi feita através de 12 tubos de 4,8 mm internos ao lavador, mas em um único plano de injeção localizado no início da seção convergente. Os autores trabalharam com uma velocidade constante na garganta de 72 m/s e L/G igual a 1,3 L/m³. As medidas de tamanho de gota foram feitas em 4 posições axiais. Na entrada e na saída da garganta e no meio e final do difusor. Leith *et al.* (1985) apresentaram em seus resultados diâmetros médios de Sauter na escala de 200-500 μm , os quais foram muito maiores que os encontrados por Bayvel (1980) ou Atkinson e Strauss (1978). Os autores admitiram em seu trabalho que somente gotas acima de 30 μm podem ser medidas com confiança utilizando o aparato experimental empregado nesse estudo, isso faz com que a técnica não seja adequada para realizar medida de tamanho de gota em lavadores Venturi, onde pequenas gotas são produzidas e uma análise exata dessas gotas é requerida (Fernández Alonso *et al.*2001).

Em 1988 Teixeira *et al.* também aplicaram uma técnica de difração de laser para medir tamanho de gotas em um tubo vertical e com duas variedades de inserções, um Venturi e um prato, inseridos no tubo. Nesse estudo, utilizando o Venturi, água foi introduzida através

de uma parede porosa imediatamente antes da convergência e as medidas de tamanho de gotas foram feitas na saída do difusor. A distribuição de tamanho de Rosin-Rammler foi usada para ajustar os dados de distribuição. Os tamanhos de gotas obtidos com o Venturi foram comparados com os tamanhos de gotas obtidos no tubo simples e foi constatada uma diminuição do tamanho das gotas com a inserção da constrição Venturi. Os tamanhos das gotas medidos pelo autor foram significativamente menores que os previstos pela equação de Nukiyama e Tanasawa (1938).

Gonçalves (2000) e Fernández Alonso *et al.* (2001) mediram a distribuição do tamanho de gotas em um lavador Venturi de seção circular com diâmetro da garganta de 19 mm, utilizando a técnica de difração a laser. Os fluidos utilizados foram ar e água e as velocidades de gás empregadas na garganta foram de 50, 70 e 90 m/s. A injeção do líquido foi feita na forma de filme e jatos transversais. A injeção na forma de filme foi feita através de uma parede porosa e a injeção na forma de jatos foi feita na garganta do lavador através de 5 orifícios de 1mm de diâmetro. As razões L/G empregadas foram de 0,5; 1; 1,5 e 2 L/m³. As medidas de tamanho de gota foram feitas em 3 posições ao longo do eixo de lavador. A primeira a 23 mm após o plano de injeção, a segunda a 70mm e a terceira logo após a saída do difusor. Variando essas condições operacionais o autor pode observar que os diâmetros representativos apresentam a tendência de diminuir com o aumento da velocidade do gás. Em relação à variação da razão L/G observou-se que a sua influência sobre o diâmetro médio de Sauter não é tão clara e tão intensa quanto à influência da velocidade do gás. Quanto à evolução das gotas ao longo do lavador Venturi notou-se que gotas de maiores tamanhos começam a aparecer e a predominar a medida que os fluidos avançam no lavador, os autores concluíram que esse comportamento era resultado principalmente da coalescência das gotas. Em relação às correlações existentes para predição do tamanho de gotas Gonçalves (2000) concluiu que a correlação proposta por Nukiyama e Tanasawa (1938) superestima consideravelmente o diâmetro médio de Sauter, particularmente para altas velocidades e exagera a influência da razão L/G independentemente do tipo de injeção realizada (filme ou jatos). Já a equação proposta por Boll *et al.* (1974) correlacionou de forma mais adequada esse diâmetro ficando dentro da faixa de erro experimental prevista por Boll *et al.* (1974) (cerca de 15%) para a injeção na forma de jatos e superestimou levemente os diâmetros obtidos para a injeção na forma de filme. A correlação proposta por Kim e Marshall (1971) teve bom desempenho para a injeção na forma de jatos apenas para a maior velocidade do gás, isso foi explicado pelo fato da correlação ter sido desenvolvida em experimentos com altas

velocidades de gás. Já para a injeção na forma de filme essa correlação subestimou os valores de D_{32} em todas as condições operacionais empregadas. A correlação proposta por Azzopardi e Govan (1984) apresentou desempenho um pouco inferior a de Boll *et al.* (1974) subestimando os valores do diâmetro médio de Sauter em ambas as formas de injeção de líquido. Gonçalves (2000) concluiu através dos resultados que a correlação proposta por Boll *et al.* (1974) pode ser recomendada para estimar o D_{32} adequadamente.

Costa *et al.* (2004) também realizaram um estudo experimental utilizando a técnica de difração a laser. A distribuição do tamanho de gotas foi realizada em um lavador Venturi de seção retangular com dimensões de 35x24 mm na garganta. No estudo foram variados a velocidade de gás, a razão L/G e os pontos de medida após o plano de injeção do líquido. As velocidades de gás estudadas foram em torno de 58, 66 e 75 m/s na garganta. O líquido (água) foi injetado através de um único orifício localizado na garganta do lavador e as razões L/G empregadas foram de 0,007; 0,17 e 0,27 L/m³. Os pontos de medida foram a 64, 118 e 173 mm após o plano de injeção. Os resultados encontrados em relação a variação da velocidade do gás e pontos de medida apresentaram comportamento semelhante aos encontrados por Gonçalves (2000). No entanto em relação à razão L/G o tamanho da gota mostrou-se significativamente influenciado pelas baixas razões L/G empregadas nesse estudo, comportamento que não é previsto nas correlações utilizadas para predição do tamanho de gotas, já que tanto Boll *et al.* (1974) quanto Nukiyama e Tanasawa (1938) trabalhando com razões L/G maiores encontraram que o tamanho da gota aumenta muito levemente com o aumento de L/G.

Viswanathan *et al.* (2005) estudaram o tamanho de gota e a distribuição delas no interior de um lavador Venturi de seção retangular com área da garganta igual a 0,012 m². Neste estudo água era introduzida no início garganta do lavador através de 34 orifícios (17 orifícios de cada lado) perpendicularmente orientados em relação à corrente de ar. A velocidade do ar na garganta do equipamento foram 45, 60 e 75 m/s e as razões L/G variadas entre 0,4 e 1,8 L/m³. As medidas de tamanho de gotas foram feitas usando a um anemômetro laser Doppler. Através dos resultados experimentais os autores verificaram que o diâmetro médio das gotas aumentou com o aumento da razão L/G e diminuíram com o aumento da velocidade do gás. Os autores também compararam os diâmetros médios de Sauter medidos experimentalmente com os valores previstos pelas correlações propostas por Boll *et al.* (1974) e Nukiyama e Tanasawa (1938). Os resultados experimentais foram bem correlacionados pela correlação de Boll *et al.* (1974) apenas para a menor velocidade do gás estudada (45 m/s).

Entretanto, com o progressivo aumento da velocidade do gás na garganta os diâmetros médios medidos desviaram consideravelmente dos previstos por esta correlação. Já os diâmetros de Sauter previstos pela correlação de Nukiyama e Tanasawa (1938) superestimaram os valores de diâmetros medidos para todas as condições experimentais.

Silva *et al.* (2008) estudaram a formação de gotas em um lavador Venturi de seção retangular com diâmetro da garganta com 122,5 mm. A razão L/G foi variada entre 0,03 e 0,09 L/m³ e as velocidades na garganta entre 34 e 70 m/s. O líquido foi injetado no lavador por dois métodos: parede porosa e por orifícios. A injeção através de orifícios foi feita por 4 orifícios, com 1,5 mm de diâmetro, os orifícios eram igualmente distribuídos ao redor do perímetro do lavador e ficavam localizados 200 mm antes da seção convergente do lavador. As gotas foram medidas ao longo da garganta e difusor em três posições, duas na garganta a 0,23 m e 0,53 m do ponto de injeção, e uma medida foi feita no difusor a 1,27 m do ponto de injeção de líquido. Os autores mediram os tamanhos de gotas utilizando a técnica de difração do raio laser, mais especificamente o equipamento Malvern, Modelo 2600. Os autores concluíram que quando o líquido era injetado através de orifícios, o aumento na vazão de líquido causava a diminuição do tamanho da gota. Por outro lado, quando o líquido era injetado como um filme a influência da vazão de líquido não alterava significativamente o tamanho da gota. Os autores também compararam os tamanhos de gotas medidos experimentalmente com os valores calculados pelas correlações propostas por Nukiyama e Tanasawa (1938) e Boll *et al.* (1974) sendo que os dados não foram bem correlacionados por nenhuma das correlações .

Tabela 2.4 – Estudos de tamanho de gotas em lavadores Venturi

Autor(es)	Geometria	Dimensões garganta (m)	Injeção de líquido	Método de medida
Parker e Cheong (1973)	Circular	0,025	Filme	MgO lâmina
Boll <i>et al.</i> (1974)	Retangular	0,305x0,035	Jato	Atenuação luz
Atkinson e Strauss (1978)	Retangular	0,016x0,04	Jato	Fotográfico
Bayvel (1980)	Circular	0,06	Jato	Difração de laser
Robert e Hill (1981)	Retangular	0,076x0,15	Jato	Fotográfico
Azzopardi e Govan (1984)	Circular	0,01	Filme	Difração de laser
Leith <i>et al.</i> (1985)	Circular	0,054	Jato	Fotográfico
Teixeira <i>et al.</i> (1988)	Circular	0,019	Filme	Difração de laser
Fernandez Alonso <i>et al.</i> (2001)	Circular	0,019	Jato/Filme	Difração de laser
Costa <i>et al.</i> (2004)	Retangular	0,035x0,024	Jato	Difração de laser
Viswanathan <i>et al.</i> (2005)	Retangular	0,076x0,267	Jato	Laser Doppler
Silva <i>et al.</i> (2008)	Circular	0,1225	Jato/Filme	Difração de laser

A maioria dos estudos realizados com o intuito de medir a distribuição de tamanho de gotas especificamente em lavadores Venturi não apresenta correlações gerais para a previsão de tamanho de gotas. Em sua grande maioria os autores utilizam as correlações propostas por Nukiyama e Tanasawa (1938) ou então, a proposta por Boll *et al.* (1974). Estas correlações também são amplamente utilizadas para predição de tamanho de gotas utilizadas em projetos para construção de lavadores.

O tamanho das gotas geradas no processo de atomização é motivo de grande interesse para diferentes processos industriais, como na combustão, em spray drying, fornos industriais entre outros.

Em 1995 Kihm *et al.*, utilizando o princípio de difração de raio laser (sistema Malvern), mediram o tamanho das gotas originadas da atomização de um jato em um corrente de ar. Os autores variaram as condições experimentais como a velocidade do jato, velocidade do gás e diâmetro do orifício de injeção de líquido. Neste estudo os autores propuseram uma correlação baseada em números adimensionais para descrever os dados experimentais.

$$\frac{D_{32}}{d_o} = 1,015 \cdot 10^{19} \cdot Re_g^{-3,5998} \cdot Re_l^{-1,8094} \cdot We_g^{2,2474} \cdot \left(\frac{x}{d_o}\right)^{0,6867} \cdot \left(\frac{y}{d_o}\right)^{1,9718} \quad (2.30)$$

Onde: d_o é o diâmetro do orifício de injeção do líquido, Re_g e Re_l o número de Reynolds do gás e do líquido, respectivamente, We_g é o numero de Weber, x é a coordenada paralela à corrente de ar e y a coordenada perpendicular à corrente de ar.

Nesta correlação pode-se verificar que o diâmetro médio de Sauter é uma função de $V_j^{-1,8094}$, isto é, o D_{32} é inversamente proporcional a velocidade do jato líquido, já que o valor do número de Reynolds do líquido está elevado a -1,8094.

Em 1998 Wu *et al.* estudaram as gotas formadas quando um único jato líquido era injetado em uma corrente de ar. A técnica utilizada para a medição das gotas foi à anemometria laser Doppler. Os autores não propuseram uma correlação para o diâmetro médio de Sauter, mas verificaram que para as condições experimentais estudadas os diâmetros médios diminuía com o aumento da velocidade do ar e também com o aumento da velocidade do jato. Os autores sugeriram que essa redução pode ser explicada devido à geração de um grande número de pequenas gotas originadas da ruptura de superfície, a qual ocorre nos casos com maiores valores de q e We_g . Os autores sugeriram que a variação no mecanismo de ruptura do jato conforme V_j aumentava poderia ser diferente para as faixas de velocidade do gás estudada.

Costa *et al.* (2006) em seu estudo sobre a atomização variando o ângulo de injeção do líquido na corrente de ar, mediram os tamanhos de gotas geradas no processo e observaram a diminuição do tamanho da gota com o aumento no ângulo de injeção do líquido. Os autores sugeriram que esta diminuição estaria associada às maiores forças de arrasto atuando na superfície do líquido com o aumento do ângulo da injeção.

2.10. Estudos sobre a fração de filme líquido

Durante o processo de atomização do líquido em lavadores, nem todas as gotas geradas contribuem na eficiência de coleta do equipamento, visto que, uma fração destas gotas deposita-se nas paredes do lavador formando um filme. Além da diminuição da quantidade de líquido disponível para coleta de contaminantes, a geração do filme aumenta a perda de carga dentro do lavador, devido ao atrito entre o gás e a superfície rugosa do filme. A perda de carga faz com que haja um aumento do custo operacional do lavador Venturi.

A divisão de líquido entre gotas e filme pode ser caracterizada pela fração de filme, ou seja, a fração de líquido que escoar pelas paredes do equipamento em relação que vazão que foi injetada em seu interior.

Desta forma, o desempenho de coleta de um lavador é significativamente afetado pela presença e características do filme depositado em suas paredes. Apesar disso, apenas um número limitado de autores estudaram e quantificaram este fenômeno, principalmente para lavadores os quais utilizam a injeção de líquido através de orifícios. (Viswanathan *et al.*, 1997; Viswanathan, 1998; Gonçalves, 2000; Costa, 2002 e Viswanathan *et al.* 1984). São poucos os estudos que incluem os efeitos do filme líquido em modelos para lavadores Venturi. O motivo está na dificuldade em se descrever matematicamente este fenômeno.

Viswanathan *et al.* (1984) investigaram experimentalmente o filme formado em um lavador Venturi com injeção de líquido por vários orifícios. Os resultados mostraram que o aumento da razão líquido-gás proporcionou uma redução na fração de líquido escoando como filme nas paredes. Os autores também observaram que o aumento da velocidade do gás fez com que reduzisse a taxa de fluxo líquido escoando na parede.

Azzopardi e Govan (1984) e Azzopardi *et al.* (1991) foram os primeiros pesquisadores a propor um modelo para o escoamento do filme líquido nas paredes de lavadores Venturi. Estes autores se basearam na teoria de escoamento anular em tubos de seção transversal constante. O modelo foi desenvolvido baseado em dados experimentais em um lavador Venturi de seção transversal circular, com injeção de líquido na forma de filme.

No entanto o modelo também pode ser aplicado para injeções com jatos, neste caso basta considerar que a fração atomizada no início da garganta seja igual a 1. Em 1993 Azzopardi avaliou o desempenho do modelo proposto por ele e colaboradores em 1991, para isso o autor comparou varios resultados experimentais com os resultados obtidos utilizando o seu modelo. O autor concluiu que o modelo estimava a formação do filme com precisão na faixa de $\pm 25\%$ ao final do difusor.

O modelo tridimensional proposto por Fathikalajahi *et al.* em 1995 para prever a distribuição de gotas em um lavador Venturi também foi usado por seus autores para prever a fração de filme. Os autores relataram uma boa concordância entre os seus dados experimentais de fração de filme e as previsões do modelo.

Em 1997 Viswanathan *et al.* apresentaram um modelo alternativo com o propósito de quantificar a fração de filme. O modelo de Viswanathan *et al.* (1997) consiste no ajuste de um conjunto específico de dados experimentais, obtidos em um lavador Venturi retangular, com injeção de líquidos na forma de jatos. O filme foi extraído através de uma parede porosa, colocada depois do ponto de injeção de líquido. Os autores propuseram a seguinte correlação para o cálculo da fração de filme:

$$F_f = 3,92 \times 10^5 \left[(L/G) (MW_g / \rho_g) (R_0 / d_o) \right]^{-1,7} (V_g)^{-1,29} \quad (2.31)$$

em que: F_f é a fração de filme, L/G é a razão entre as vazões volumétricas de líquido e gás, em L/m^3 , MW_g e ρ_g são a massa molecular e a densidade do gás, respectivamente, R_0 é a metade da distância entre a parede pela qual o líquido está sendo injetado e a parede oposta, d_o é o diâmetro do orifício de injeção de líquido e V_g é a velocidade do gás na garganta.

A principal limitação do modelo de Viswanathan *et al.* (1997) é que a correlação não inclui o número de orifícios. Gonçalves (2000) mostrou que, mantendo os demais parâmetros constantes, um diferente número de orifícios produz diferentes penetrações, e, portanto diferentes frações de filme. Desta forma, Gonçalves (2000) em seu estudo experimental verificou que a fração de filme depositada no lavador Venturi variava com a penetração do jato líquido. Através de seus dados experimentais Gonçalves (2000) sugeriu a correlação empírica expressa pela equação 2.32:

$$F_f = 200,5 \left[1,01 \frac{\ell^{**}}{D_{eq,th}} - \left(\frac{\ell^{**}}{D_{eq,th}} \right)^{1,75} \right]^{-1,66} (Re_g)^{-0,80} \quad (2.32)$$

onde L/G em L/m^3 é a razão entre as vazões volumétricas do líquido e do gás, $D_{eq,th}$ é o diâmetro equivalente da garganta (m), Re_g é o número de Reynolds na garganta do Venturi e ℓ^{**} é a penetração máxima da linha central do jato (m).

Segundo Gonçalves (2000) esta nova correlação também falha na previsão da fração de filme em pontos próximos ao ponto da injeção, e, portanto não pode ser recomendada para esta finalidade. Para pontos distantes da injeção, as estimativas da equação 2.32 são, no seu conjunto, melhores que previstas por Viswanathan *et al.* (1997), mas ainda não são totalmente satisfatórias. Em seu estudo Gonçalves (2000) relata a dificuldade em se propor uma única correlação experimental que possa prever em todos os casos um fenômeno tão complexo como a fração de filme líquido em um lavador Venturi.

Em 2002 Costa avaliou a fração de líquido depositada em um lavador retangular com líquido sendo injetado por apenas um orifício. Os resultados deste estudo mostraram que variando a penetração do jato, as gotas recém formadas estão inicialmente concentradas mais longe ou mais perto das paredes, e isso influencia na fração de filme (Costa 2002).

Em 2004 Gonçalves *et al.* avaliaram a evolução da fração de filme em função da distância axial a partir do ponto de injeção do líquido. Os autores observaram através de dados experimentais em lavadores de seção circular e retangular que próximo ao ponto de injeção, a fração de filme é menor, aumentando a medida que se afastava da injeção de líquido. Os autores também mostraram que a fração de filme depositada nas paredes do equipamento depende da velocidade do gás e da razão L/G . Distante dos pontos de injeção, a fração de filme permanecia aproximadamente constante. A partir dos resultados experimentais Gonçalves *et al.* (2004) propuseram uma nova correlação levando em conta a influência distancia axial.

$$F_f = \left(\frac{\bar{z}}{z + 0,653} \right) \left[1 + F(\bar{l}) \cdot \exp(-0,0391 \cdot \bar{z}) \right] \cdot \frac{1000}{Re_g^{0,802}} \quad (2.33)$$

$$F(\bar{l}) = 11,92 \cdot (\bar{l}^{1,57} - \bar{l}) + 1 \quad (2.34)$$

Onde: \bar{z} é a distância ao longo do Venturi e dada por:

$$\bar{z} = \frac{z}{D_{eq,th}} \quad (2.35)$$

e \bar{l} é a penetração do jato sobre a dimensão da garganta

$$\bar{l} = \frac{0,1145 \cdot V_j \cdot \rho_l \cdot d_o}{V_g \cdot \rho_g \cdot (2 \cdot R_o)} = \frac{\ell^{**}}{(2 \cdot R_o)} \quad (2.36)$$

Daher (2008) estudando a fração de filme em um lavador Venturi retangular evidenciou que a fração de filme variava significativamente com a penetração do jato líquido e propôs uma correlação empírica para ajuste de seus dados experimentais baseada na correlação proposta por Gonçalves *et al.* (2000). Esta correlação é mostrada na equação 2.37.

$$Ff = 10,68 \times 10^6 \times \left(9,99 \times \left(\frac{\ell^{**}}{D_h} \right) + \left(\frac{\ell^{**}}{D_h} \right)^{-0,7} \right)^{2,25} \times (\text{Re}_g)^{-1,49} \times \left(\frac{d_{eqor}}{D_h} \right)^{0,25} \quad (2.37)$$

Onde: ℓ^{**} é calculado pela equação 2.2, D_h é o diâmetro hidráulico da tubulação e d_{eqor} é a distância equivalente ao número e posição dos orifícios que estão sendo usados na injeção de líquido e é dada por:

$$d_{eqor} = \frac{\left(\frac{mH + nL}{2} \right)}{m + n} \quad (2.38)$$

onde:

m : número de orifícios ativos verticais

n : número de orifícios ativos horizontais

H: altura da garganta do lavador.

L: largura da garganta do lavador.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Aparato experimental

3.1.1. Testes preliminares

Foram realizados testes experimentais preliminares em um lavador Venturi de seção retangular que se apresentava disponível no laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. O lavador todo era construído em módulos de acrílico para tornar possível a inserção de outros módulos ou seções de testes. A Tabela 3.1 mostra as dimensões principais do lavador Venturi.

A injeção de líquido na garganta do lavador Venturi foi efetuada por uma bomba helicoidal tipo MS.

A corrente de ar foi gerada por um soprador radial da marca Ibram modelo CRE-05, com pressão de 6280 mmca e vazão máxima de 8,2 m³/min. A vazão de ar foi medida utilizando um tubo Pitot acoplado a um micromanometro digital modelo FCO 14, sendo que as vazões de ar foram ajustadas e mantidas constantes durante os testes.

Tabela 3.1- Dimensões da geometria do lavador Venturi

Grandeza	Valor
Altura	35 mm
Largura na entrada e saída	64 mm
Largura da garganta	24 mm
Comprimento da seção convergente	99 mm
Comprimento da garganta	60, 120 e 180 mm
Comprimento da seção divergente	280 mm
Meio ângulo convergente	11,4 ^o
Meio ângulo divergente	4,1 ^o

O lavador operava horizontalmente e com injeção de líquido através de 1 a 5 orifícios de aproximadamente 1mm de diâmetro distribuídos na garganta do Venturi, os quais estão detalhados na Figura 3.1. Originalmente os orifícios foram feitos no próprio acrílico com diâmetro de 1mm, no entanto com o passar do tempo e inúmeros testes com injeção de líquido em alta velocidade podem ter ocasionado o aumento desse diâmetro. Estes orifícios

podiam ser utilizados individualmente ou simultaneamente. Os números de orifícios e configuração adotados nos testes podem ser vistos na Tabela 3.2.

A vazão de líquido injetada no equipamento era controlada por um rotâmetro da marca Key Instruments com escala de vazão na faixa de 100 a 1500 mL/min. O líquido era conduzido até os orifícios através de mangueiras flexíveis de silicone. Quando se desejava diminuir o número de orifícios em funcionamento eram colocados estranguladores para obstruir a entrada de líquido pelos orifícios que não estavam em funcionamento.

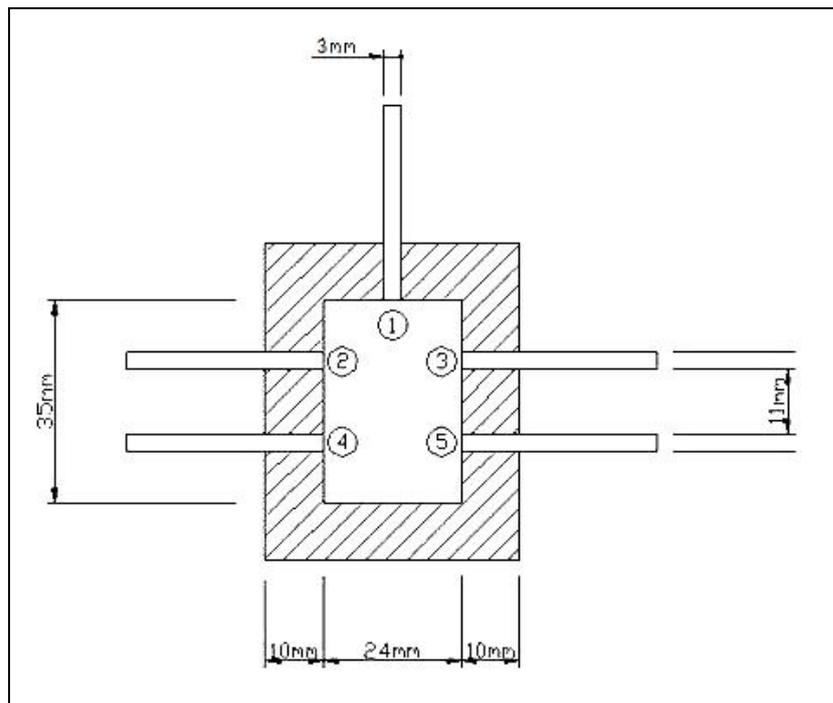


Figura 3.1- Vista esquemática da posição dos orifícios.

Tabela 3.2 – Configurações de orifícios utilizadas nos testes.

Número de orifícios ativos	Orifícios em funcionamento
1	1
3	1, 2 e 3 – Modo 1 1, 4 e 5 – Modo 2
5	1 a 5

Os testes preliminares de medidas de tamanho de gotas foram realizados variando-se o número de orifícios de 1 a 5, a velocidade de gás na garganta, a vazão total de líquido e o comprimento da garganta. A razão L/G ficou entre 0,1 e 0,26 L/m³, sendo que as velocidades do gás na garganta foram de 59; 64 e 69 m/s e a vazão total de líquido injetada na garganta do lavador Venturi de 300, 600 e 900 mL/min. Também foram variados os comprimentos de garganta (60, 120 e 180 mm).

Os testes preliminares tiveram por objetivo avaliar as condições de operação relevantes e também adquirir familiaridade com o processo e princípios de operação do equipamento.

Posteriormente foi construído outro lavador Venturi com dimensões e número de injeção de líquido diferente e também com os orifícios de injeção feitos em latão, para evitar possíveis desgastes e variações do diâmetro de injeção com o uso contínuo do lavador.

3.1.2. Novo Lavador Venturi

As dimensões do novo lavador podem ser vistas na Tabela 3.3 e na Figura 3.2.

Tabela 3.3- Dimensões da geometria do lavador Venturi

Grandeza	Valor
Altura	40 mm
Largura na entrada e saída	75 mm
Largura da garganta	27 mm
Comprimento da seção convergente	130 mm
Comprimentos de garganta	60, 120 e 180 mm
Comprimento da seção divergente	340 mm
Meio ângulo convergente	10,5°
Meio ângulo divergente	4,0°

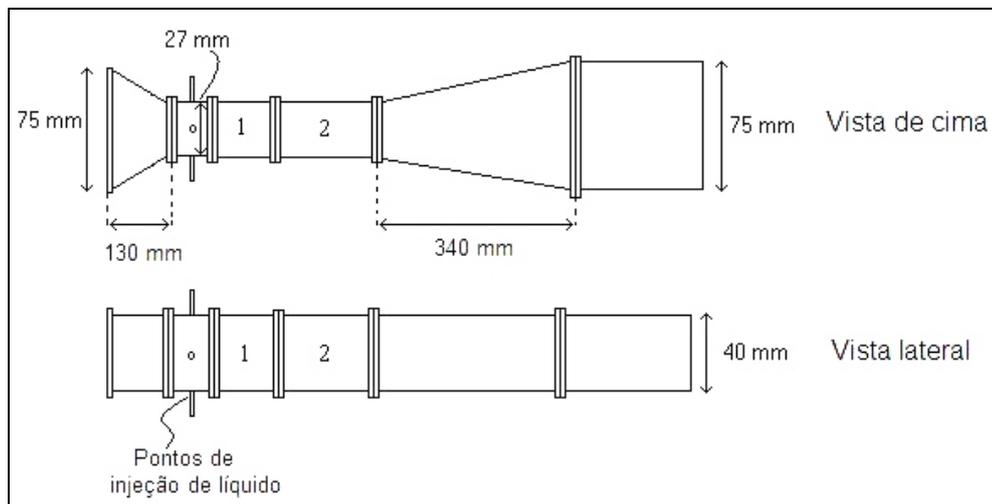


Figura 3.2 – Esquema do lavador Venturi com o comprimento total de garganta.

O lavador também foi construído em módulos, de modo a tornar possível a inserção de outras peças ou seção de testes. Os módulos eram fixados uns aos outros através de parafusos situados nos flanges de cada peça e cola de silicone. Para tornar possível o aumento do comprimento da garganta foram construídos dois módulos com tamanhos de 60 e 120 mm

quando acoplados juntamente resultavam no maior comprimento de garganta (180 mm). A Figura 3.3 mostra os diferentes tamanhos de gargantas utilizados nas medidas experimentais.

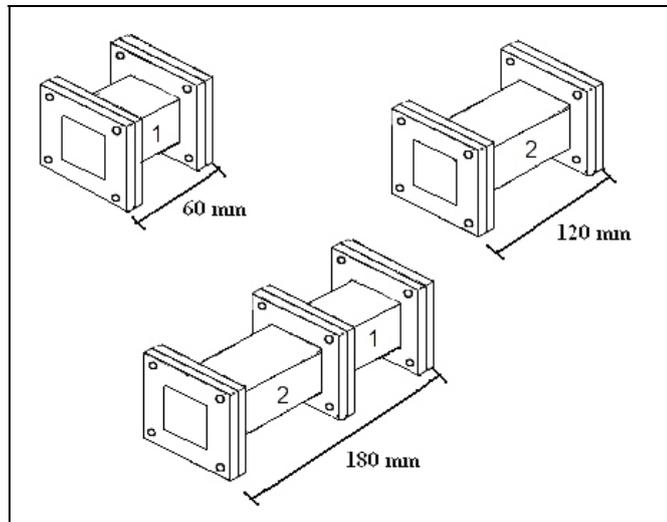


Figura 3.3 – Diferentes tamanhos de garganta.

O módulo de injeção de líquido possuía quatro orifícios, um em cada parede da garganta. O número de orifícios para injeção do líquido também foi variado para os diferentes testes realizados. Quando se desejava diminuir o número de orifícios em funcionamento eram colocados estranguladores para obstruir a entrada de líquido pelos orifícios que não estavam em funcionamento. As configurações de injeção do líquido podem ser vistas na Figura 3.4 e Tabela 3.4.

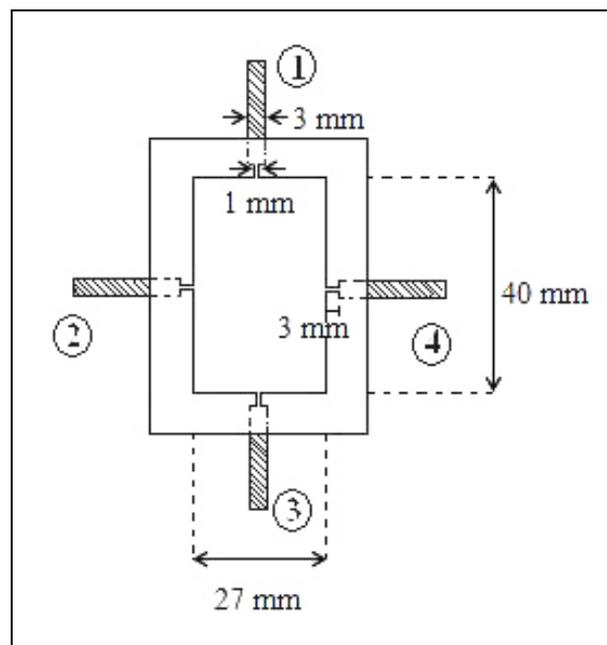


Figura 3.4 – Esquema da injeção de líquido na garganta do lavador.

Tabela 3.4: Configurações de injeção do líquido

Números de orifícios ativos	Orifícios em funcionamento
1	1
2	1 e 3 - Modo 1 2 e 4 - Modo 2
3	1, 2 e 3
4	1 a 4

Para a injeção do líquido no equipamento foi utilizada uma bomba helicoidal modelo MS. A água era mantida em um tanque e a vazão total de injeção era medida através de um rotômetro da marca Key Instruments com capacidade de medir vazões na faixa de 100 a 1500 mL/min.

A vazão de ar era gerada por um soprador da marca Ibram, modelo CRE05, com pressão de 6280 mmca e vazão máxima de 8,2 m³/min. O ar era captado diretamente do ambiente do laboratório por este soprador. A vazão de ar efetivamente injetada no equipamento era ajustada por uma válvula posicionada na saída do soprador. A vazão de ar era medida com um tubo de Pitot acoplado a um micromanômetro digital da marca *Furness Controls*, modelo FCO-012.

Na saída do lavador Venturi estava acoplado um ciclone que possibilitava a separação do líquido do gás. O ciclone de entrada tangencial e fluxo reverso acoplado ao final do lavador possuíam diâmetro igual a 66 cm.

3.2. Condições experimentais

Para a realização das medidas experimentais variou-se as velocidades de gás na garganta (59; 64; 69 e 74 m/s), as vazões de líquido introduzidas no equipamento de 300-1200 mL/min., sendo que a razão L/G ficou entre 0,07 e 0,3 L/m³.

As vazões de líquido mencionadas representam a vazão total de líquido injetada no equipamento. Assim sendo, a vazão de líquido referente a 1200 mL/min, para a configuração de 4 orifícios, por exemplo, é a vazão total de líquido injetada no equipamento, o que corresponde a 300 mL/min em cada orifício.

É necessário destacar que devido a limitação da potência da bomba utilizada para a injeção de líquido, foi possível obter uma vazão máxima de 600 mL/min para a injeção de líquido através de 1 orifício. Para a configuração 2 orifícios modo 1 e modo 2 somente foram possíveis realizar medidas até as vazões de líquido total de 1100 mL/min. e 900 mL/min respectivamente, acima deste valor as janelas de quartzo eram atingidas por gotas

impossibilitando as medidas de tamanho de gotas. Por estes mesmos motivos as razões L/G ficaram abaixo das usualmente utilizadas em lavadores Venturi ($L/G = 0,5$ a $2,5 \text{ L/m}^3$).

3.3. Trajetória do jato

Para que a visualização do jato fosse possível utilizou-se uma garganta com 140 mm de comprimento possuindo a parte frontal de vidro polido. Na parede lateral foi colocado um fundo preto para melhorar o contraste do jato de água.

As imagens foram feitas utilizando uma filmadora da marca Sony modelo DCR-DVD 403 com resolução de 3 megapixel. Para a captura das imagens a câmera filmadora foi posicionada bem próxima à parede de vidro da garganta. Em seguida iluminava-se superiormente a garganta utilizando um refletor com lâmpada de 1000 W, localizado cerca de 40 cm da parede superior.

As imagens dos jatos foram feitas variando a vazão de líquido (300 a 1200 mL/min), a velocidade do gás na garganta (59 e 74 m/s) e o número de orifícios de injeção de líquido somente de 1 a 3, para dessa forma, deixar uma parede livre de um orifício e possibilitar a melhor visualização dos jatos.

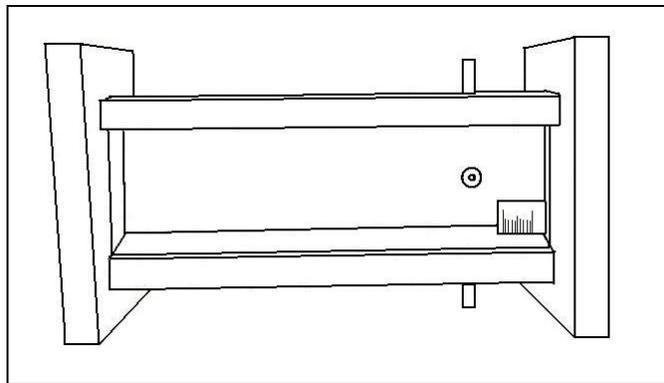


Figura 3.5 – Ilustração da garganta utilizada na captura de imagens da penetração do jato.

3.4. Distribuição de tamanho de gotas

3.4.1 Analisador de gotas

O estudo da distribuição de tamanho de gotas foi realizado utilizando o método de difração de raios laser, o equipamento adotado foi o Malvern Spraytec, instrumento esse que teve sua eficiência comprovada na determinação da distribuição de tamanho de gotas, conforme estudos realizados por Zaidi *et al.* (1998), Gonçalves (2000), entre outros.

O princípio de funcionamento do equipamento é a difração do raio laser. Este quando incide sobre uma gota faz com que parte da energia luminosa seja refletida, parte difratada e outra absorvida. O ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da gota, tornando-se assim possível obter a distribuição do tamanho de gotas em um spray.

Para criar e analisar a difração, o Malvern utiliza um sistema originalmente desenvolvido por Swithenbank *et al.* (1976) e que pode ser visto na Figura 3.6. Neste equipamento, um gerador Helio-Neon de 3 mW de potência gera luz laser de comprimento de onda de 632,8 nm. O feixe de luz é expandido por uma lente e passa pelo spray onde uma parte da energia luminosa é difratada com ângulos variados, os quais vão depender da distribuição do tamanho de gotas no spray.

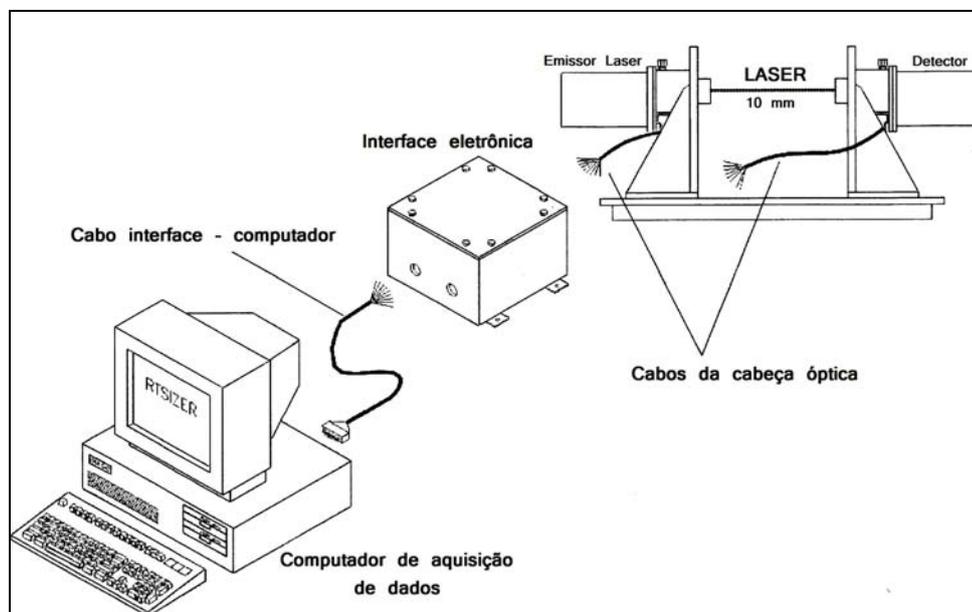


Figura 3.6 - Esquema do Malvern Spraytec.

Logo em seguida, a luz passa por uma lente de Fourier, que tem a função de direcionar os raios de mesmo ângulo para um mesmo ponto sobre o plano focal, independentemente da posição da gota no spray. Conhecendo-se esse ponto de convergência pode-se determinar o ângulo de difração e conseqüentemente o tamanho das gotas que causaram essa difração.

Sobre o plano focal do Malvern Spraytec há um detector formado por um conjunto de 31 semi-anéis concêntricos constituídos por um material foto-sensível, o qual faz com que a energia luminosa que incide em cada semi-anel gere uma corrente cuja intensidade é proporcional à intensidade do sinal luminoso. A corrente gerada forma um sinal analógico que é convertido em sinal digital antes de ser enviado para um computador. Com um programa

adequado, fornecido pelo fabricante, o qual utiliza as equações desenvolvidas por Swithenbank *et al.* (1976), baseadas na teoria de difração de Fraunhofer. Os sinais provenientes dos semi-anéis são convertidos em uma distribuição de tamanhos de gotas, em termos de volume ou número. No caso de distribuição em sprays, a representação volumétrica é a indicada. No Malvern a distribuição é dada em 32 intervalos igualmente espaçados em escala logarítmica, o programa também fornece dados como: concentração de gotas no volume amostrado e cálculo de vários diâmetros médios representativos.

3.4.2 Peça para acesso óptico do escoamento

Um dos problemas associados aos métodos ópticos é o de ganhar acesso ao interior do fluxo, visto que a característica do escoamento não pode ser alterada. Para a medida do tamanho de gotas no interior da garganta do lavador Venturi existe ainda um agravante, já que parte da água injetada através dos orifícios, na garganta do equipamento, acaba escoando na forma de um filme líquido pelas paredes. Esse filme precisa ser removido antes do ponto de amostragem das gotas afim de que o Malvern Spraytec possa realizar medidas das gotas no interior do lavador sem a interferência do filme líquido. Para contornar esses problemas uma seção de testes a qual apresenta um sistema de fendas, lâminas e janelas de quartzo, as quais permitiram que as medidas fossem realizadas de forma que houvesse a mínima perturbação do escoamento e a retirada do filme líquido.

A seção continha basicamente três elementos fundamentais: um sistema de lâminas e fendas, para a remoção do filme líquido logo no início da peça, dois canais cônicos alinhados, ligando o interior da peça com o interior do lavador e 2 janelas planas de quartzo. A Figura 3.7 mostra em detalhe a janela utilizada nos testes. As janelas eram necessárias para vedação, evitando que o fluido saísse pelos buracos da peça. Essas janelas de quartzo deveriam ficar constantemente limpas, livre de poeira e gotas. Antes dos testes elas eram devidamente polidas para a retirada de qualquer vestígio de poeira.

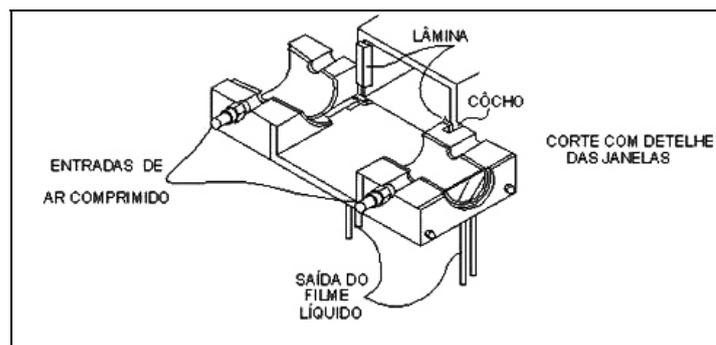


Figura 3.7 – Detalhe da janela para permitir a entrada do laser de análise das gotas.

Durante a realização dos testes, eventualmente algumas gotas entravam pelos canais cônicos e atingiam as janelas. Para evitar que isto acontecesse ar comprimido devidamente seco e filtrado era injetado próximo às janelas, formando um “colchão de ar” que impedia a aproximação das gotas. Também se revestiu as paredes dos canais cônicos com uma finíssima camada de espuma para absorver o líquido que ali se depositava.

Como o lavador foi construído em módulos era possível inserir a seção de testes ao final da garganta do lavador. O equipamento para realizar a medição das gotas, o Malvern Spraytec era posicionado na garganta do lavador Venturi de forma que o laser passasse pelos canais cônicos alinhados atravessando as janelas de quartzo. Como pode ser visto na Figura 3.8. O receptor era posicionado bem próximo à janela da seção de testes, evitando ultrapassar a máxima distância da lente receptora.

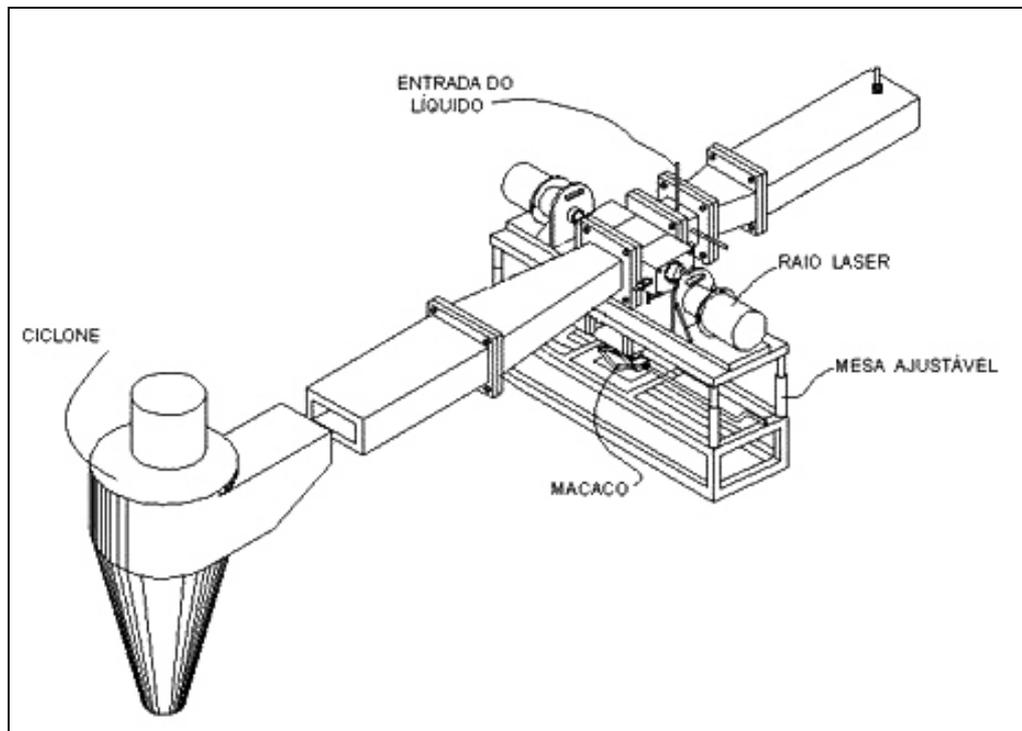


Figura 3.8 – Vista geral do aparato experimental com o Malvern Spraytec.

Em geral os procedimentos anteriores a realização dos testes eram os seguintes:

- Limpeza das janelas de quartzo;
- Inserção das janelas na seção de testes;
- Posicionamento do Spraytec com o receptor próximo a janela da seção de testes;
- Alinhamento do Spraytec com as janelas da seção;

- Alinhamento do laser com os anéis;
- Medida da luminosidade;
- Medida da interferência de ambiente;
- Eliminação do ruído elétrico;
- Ajuste da vazão de gás;
- Ajuste da vazão de líquido.

Para a realização das medidas experimentais variou-se a velocidades de gás na garganta (59; 64; 69 e 74 m/s), as vazões de líquido introduzidas no equipamento de 300-1200 mL/min, sendo que a razão L/G ficou entre 0,07 e 0,3 L/m³.

As medidas de tamanho de gotas foram realizadas em três posições axiais após a injeção do líquido a 120, 180 e 240 mm. A Figura 3.9 mostra o esquema do lavador utilizado para a maior distância axial em que foi realizada a medida do tamanho de gotas. As posições axiais foram variadas adicionando diferentes comprimentos de gargantas após a injeção do líquido e em seguida a peça apresentada na Figura 3.7, a qual permitia o acesso óptico ao escoamento. Como pode ser visto na Figura 3.9, a peça com o número 1 representa o menor tamanho da garganta (60 mm), a peça 2 representa um tamanho de garganta maior (120 mm) e a de número 3 a peça que permitia o acesso óptico ao interior do equipamento. Sendo que o feixe de laser, que realizava a medida do tamanho da gota, passava no centro da peça de acesso óptico.

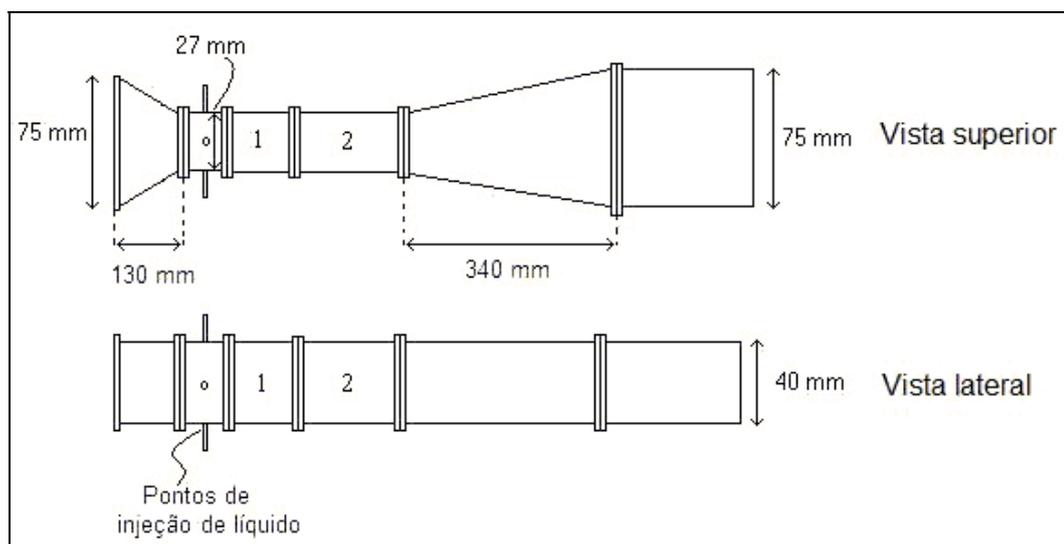


Figura 3.9 – Esquema do lavador Venturi utilizado para a maior posição axial de medição do tamanho da gota.

3.5. Seção de extração de filme das paredes

A fração do líquido escoando na forma de filme foi medida experimentalmente no lavador Venturi de seção retangular utilizando o método da fenda. Esta metodologia foi inspirada no trabalho de Hay *et al.* (1996) e foi utilizada com sucesso por Gonçalves (2000) para a extração do filme líquido.

O método da fenda utiliza uma peça como a mostrada esquematicamente na Figura 3.10, para remoção do filme líquido. Neste método o filme líquido é desviado por uma lâmina em direção à fenda, acumula-se em um pequeno reservatório, e escorre para fora do lavador Venturi, passando por um canal, uma mangueira e uma torneira. Nos ensaios realizados por Gonçalves (2000), a pressão interna era positiva suficiente para empurrar o filme para fora.

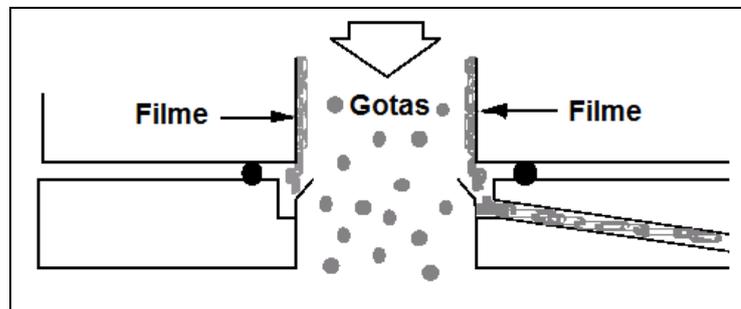


Figura 3.10 - Extração do filme pelo método da fenda.

Utilizando o método da fenda foi construída uma seção de teste como mostrada na Figura 3.11, possuindo as mesmas dimensões e geometria da garganta do lavador Venturi.

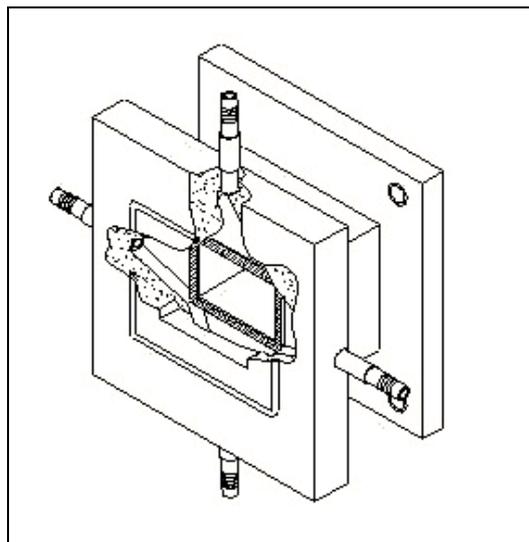


Figura 3.11- Seção de teste contendo fendas para a remoção do filme líquido.

A lâmina que desviava o filme líquido foi feita em aço inox e possuía uma leve inclinação. A lâmina penetrava 1 mm para dentro do lavador e desviava o filme em direção às

fendas contidas nas laterais das paredes e o líquido escoava para fora do lavador por um canal, como pode ser visto na Figura 3.11, neste canal eram ligadas mangueiras de silicone.

Neste método, certa quantidade de ar carrega consigo algumas gotas que inevitavelmente escapam pela fenda. Para controlar o processo de extração foram utilizados quatro estranguladores iguais nas mangueiras de saída do filme, as características e dimensões dos estranguladores podem ser vistas na Figura 3.12. Os estranguladores foram colocados em uma posição ótima, de modo a minimizar a quantidade de ar extraído, e ao mesmo tempo garantir a extração de todo o filme.

A extração do filme foi feita com os estranguladores posicionados em cada uma das mangueiras durante todo o processo.

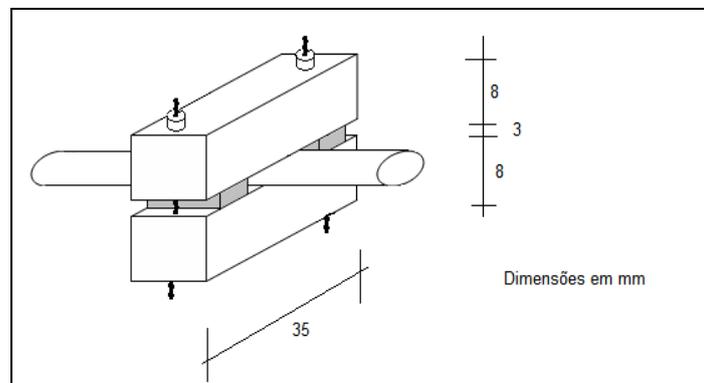


Figura 3.12 - Vista geral do estrangulador.

Para os testes de medição de fração de filme líquido foi variada a velocidade do gás na garganta (59 a 74 m/s), a vazão de líquido injetada na garganta do lavador entre 300 e 1200 mL/min. e número de orifícios de injeção do líquido.

Para avaliar a influência do comprimento de garganta na formação do filme líquido nas paredes do lavador, foram realizados testes variando o comprimento de garganta. Este teste foi realizado somente para a velocidade de 74 m/s e injeção de líquido feita através de quatro orifícios.

As medidas de fração de filme foram realizadas em três posições axiais distintas, medidas a partir da injeção do líquido até o ponto de extração do filme. O comprimento axial foi variado utilizando os diferentes módulos para aumento do comprimento de garganta apresentados na Figura 3.3. Dessa forma, as medidas foram feitas a 100, 160 e 220 mm do ponto de injeção. A Figura 3.13 mostra o ponto de amostragem para a situação em que o menor tamanho de garganta estava acoplado à garganta do lavador Venturi.

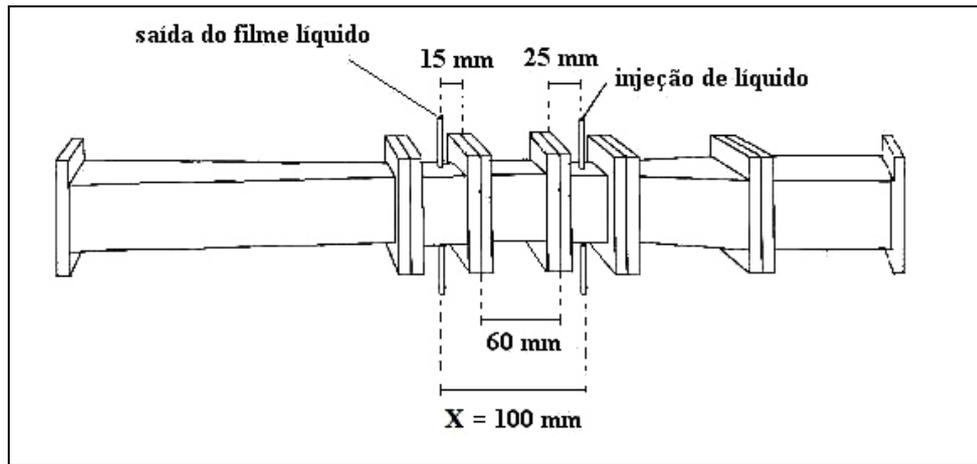


Figura 3.13 – Esquema do lavador Venturi para a menor posição axial de extração do filme líquido.

Os estudos de deposição do filme líquido nas paredes do lavador Venturi foram desenvolvidos em conjunto com a aluna de mestrado Maristela de Almeida Felício Daher (Daher, 2008). Desta forma, os experimentos referentes à fração de filme líquido também podem ser encontrados na dissertação de mestrado intitulada “Fração de filme líquido nas paredes de um lavador Venturi”.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está dividido em duas partes principais. Primeiramente são apresentados alguns dos resultados referentes a testes preliminares, os quais foram realizados em um lavador Venturi retangular com 5 orifícios de injeção de líquido. A segunda parte trata-se de um estudo mais detalhado a respeito da interação entre os jatos e a influência do número de orifícios, vazão de líquido, vazão de gás e posição axial nos tamanhos das gotas geradas no processo de atomização. Este estudo mais detalhado foi desenvolvido em um lavador retangular, o qual foi construído com injeção de líquido através de 4 orifícios. Nesta segunda parte também estão incluídos os resultados referentes à fração de filme depositada nas paredes variando as configurações de injeção. Por fim é apresentada uma estimativa dos tamanhos das gotas realizada através da análise de parâmetros adimensionais.

4.1. Testes preliminares

Foram realizados testes preliminares em um lavador que se encontrava montado no laboratório de Controle Ambiental. O objetivo destes testes foi o de familiarização com o princípio de funcionamento dos equipamentos e identificação dos parâmetros experimentais relevantes.

O estudo preliminar a respeito da distribuição de tamanho de gota em um lavador Venturi foi feito variando a velocidade de gás na garganta (59; 64 e 69 m/s), a vazão total de líquido injetada na garganta do lavador (300-900 mL/min), o número de orifícios de injeção de líquido (1 a 5 orifícios) e diferentes posições axiais (120, 180 e 240 mm), partindo do ponto de injeção do líquido até o centro da peça de acesso óptico (passagem do laser).

Os resultados de tamanho e distribuição de tamanho de gotas foram obtidos através do equipamento Malvern Spraytec. Esse equipamento fornece vários diâmetros característicos e resultados de distribuição de tamanho de gotas, representados através de histogramas e curvas cumulativas.

4.1.1. Histogramas e curvas cumulativas

O equipamento utilizado para realização das medidas de tamanho e distribuição de gotas fornece uma grande quantidade de resultados dentro de um período de tempo estabelecido. Todos os resultados aqui apresentados são curvas de distribuição de tamanho

obtidas pela média de todas as medidas realizadas no período de tempo escolhido. Todos os testes foram realizados com réplicas em diferentes dias para tirar qualquer dúvida a respeito da interferência da luminosidade do ambiente ou interferência externa.

É necessário destacar que foi possível obter valores de tamanho e distribuição de gotas para a menor vazão de líquido (300 mL/min) somente quando esse era introduzido no lavador através de um único orifício, isto porque, somente com a injeção através de um único orifício as gotas originadas do jato conseguiram ser detectadas pelo laser do equipamento Malvern Spraytec. Com os demais orifícios em funcionamento, essa pequena vazão era distribuída através de 3 a 5 orifícios o que gerava muito líquido escoando pelas paredes do lavador e as gotas formadas não conseguiam atingir a região central da garganta do equipamento, fazendo com que o medidor de gotas Spraytec não as detectassem.

Os histogramas fornecidos pelo Malvern Spraytec foram comparados com a correlação proposta por Rosin-Rammler a dois parâmetros, que é muito utilizada para representar sprays. Os parâmetros X e n da correlação foram obtidos através dos histogramas do modelo independente fornecido pelo Malvern Spraytec. O método dos mínimos quadrados ajustava as constantes da função de Rosin-Rammler de forma a minimizar a distância entre os valores cumulativos obtidos pelo equipamento e os previstos pela função. Para cada condição experimental era obtido um histograma com a distribuição de gotas, desta forma, optou-se por apresentar somente os mais relevantes, com a finalidade de destacar as suas principais características.

As curvas cumulativas e histogramas obtidos para algumas condições operacionais avaliadas estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.7 e também no Apêndice A. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a variação da distribuição de tamanho de gota variando somente a vazão (Q_l) de líquido injetado na garganta. Nas Figuras 4.3 a 4.5 estão apresentados os resultados para as diferentes configurações de injeção de líquido enquanto que nas Figuras 4.6 e 4.7 estão apresentados os dados para as diferentes velocidades na garganta (V_g) com a injeção de líquido através de cinco orifícios.

As linhas pretas representam o modelo independente obtido pelo analisador de gotas e as linhas vermelhas representam os resultados calculados pela correlação de Rosin-Rammler. Todos os resultados obtidos apresentaram distribuição uni modal, isto é, somente um pico de máximo. Através das curvas cumulativas e histogramas aqui apresentados pode-se notar claramente que a função de distribuição proposta por Rosin-Rammler representa de forma satisfatória os resultados obtidos experimentalmente.

Através das análises feitas nos histogramas e curvas cumulativas das Figuras 4.1 e 4.2, pode-se observar que houve um maior espalhamento dos histogramas no eixo x com o aumento da vazão total de líquido injetada na garganta do lavador Venturi. Sendo que para a menor vazão de líquido nota-se que o histograma está deslocado para a direita possuindo uma maior concentração na região de gotas maiores. Em geral, para a injeção através de um único orifício, pode-se verificar que a vazão total de líquido injetada na garganta do lavador influenciou significativamente o tamanho da gota gerada pelo processo de atomização do líquido. Através destas figuras pode-se observar que com o aumento da vazão de líquido houve a diminuição do tamanho das gotas.

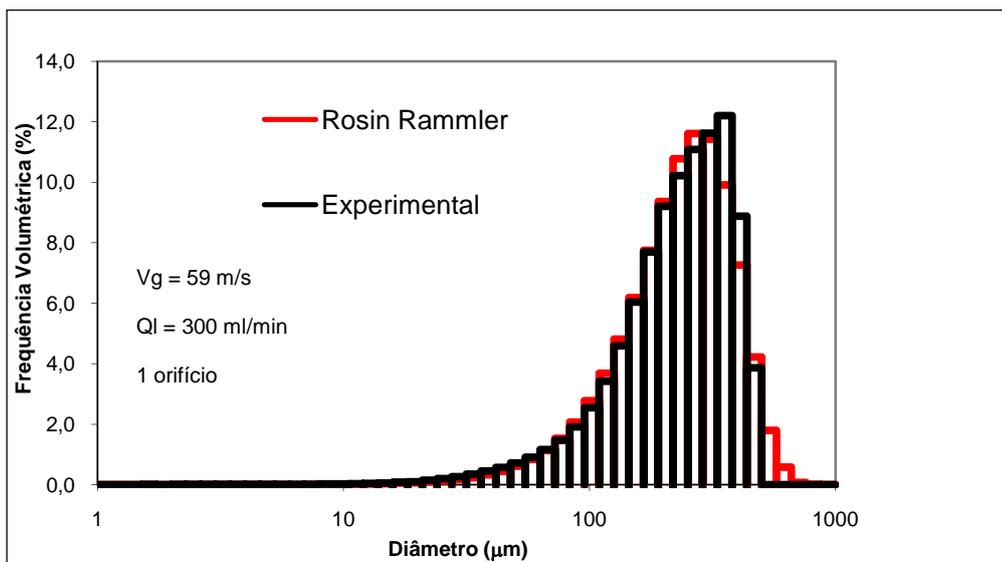
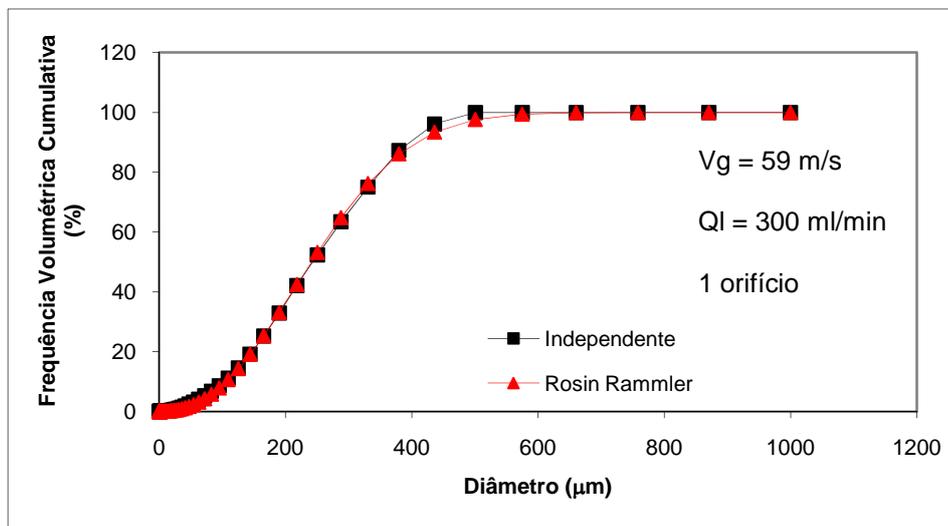


Figura 4.1 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59 \text{ m/s}$, $Q_l = 300 \text{ mL/min}$, 1 orifício e $x = 120 \text{ mm}$.

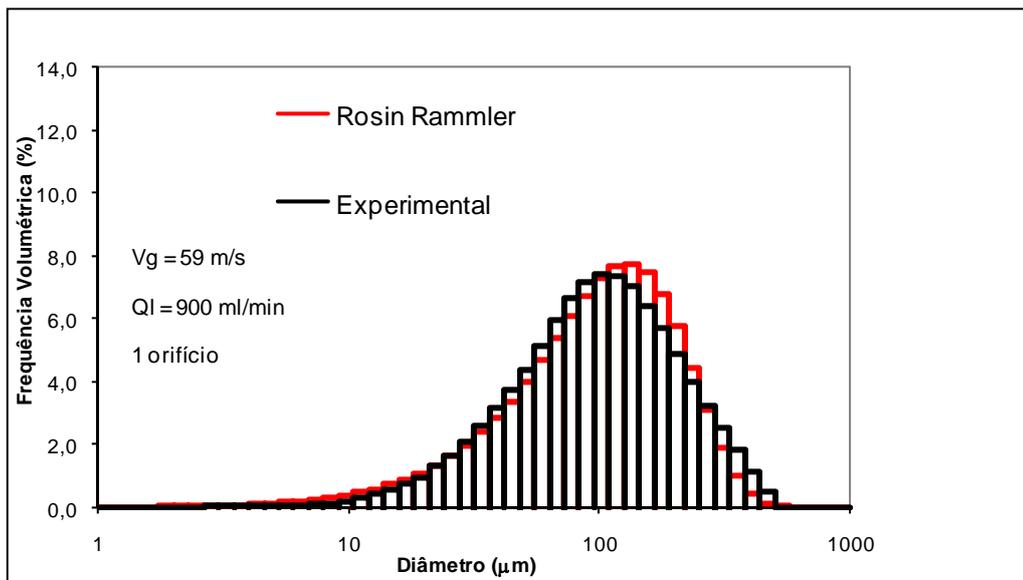
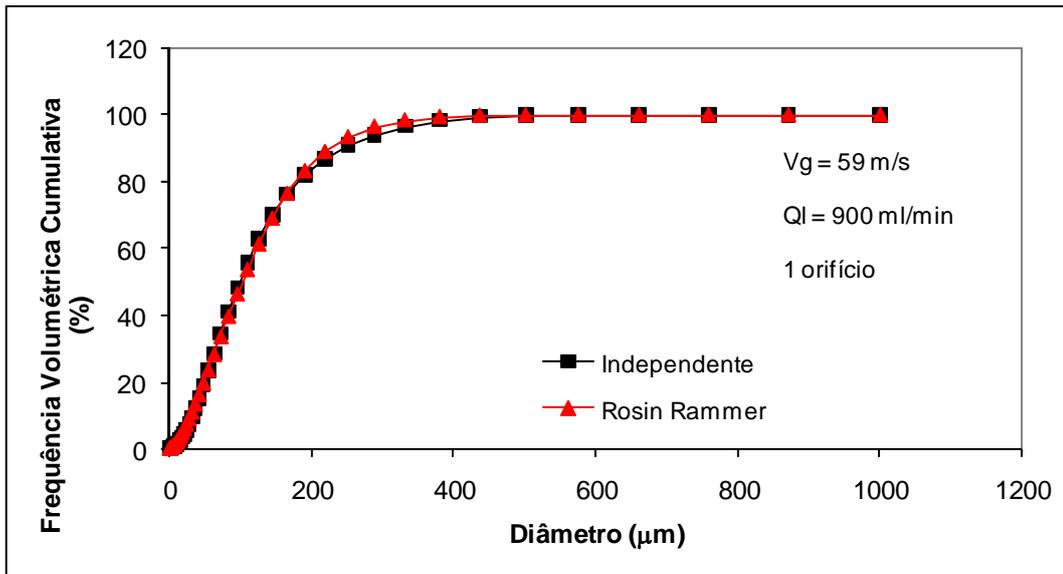


Figura 4.2 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm.

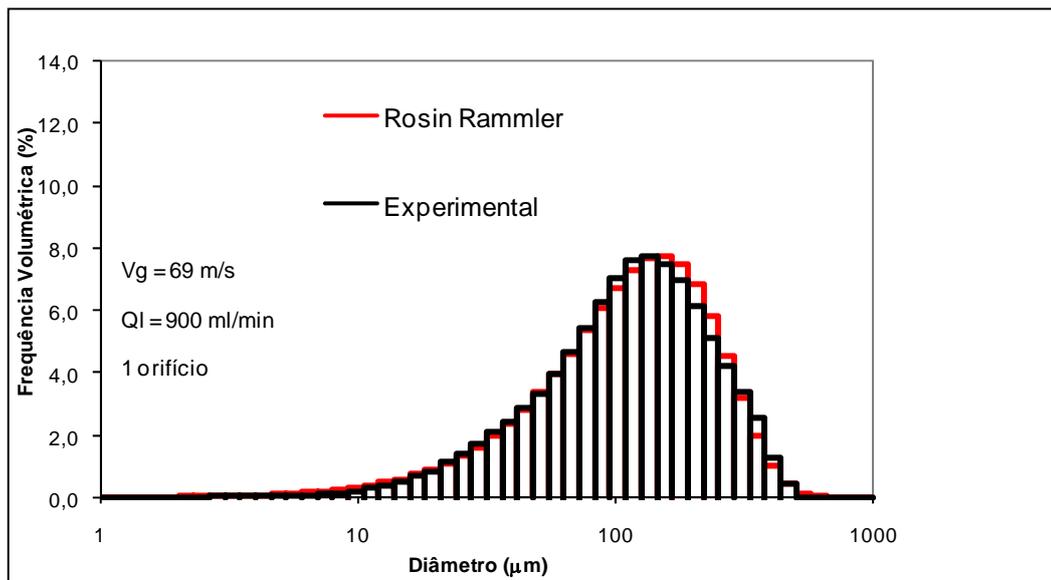
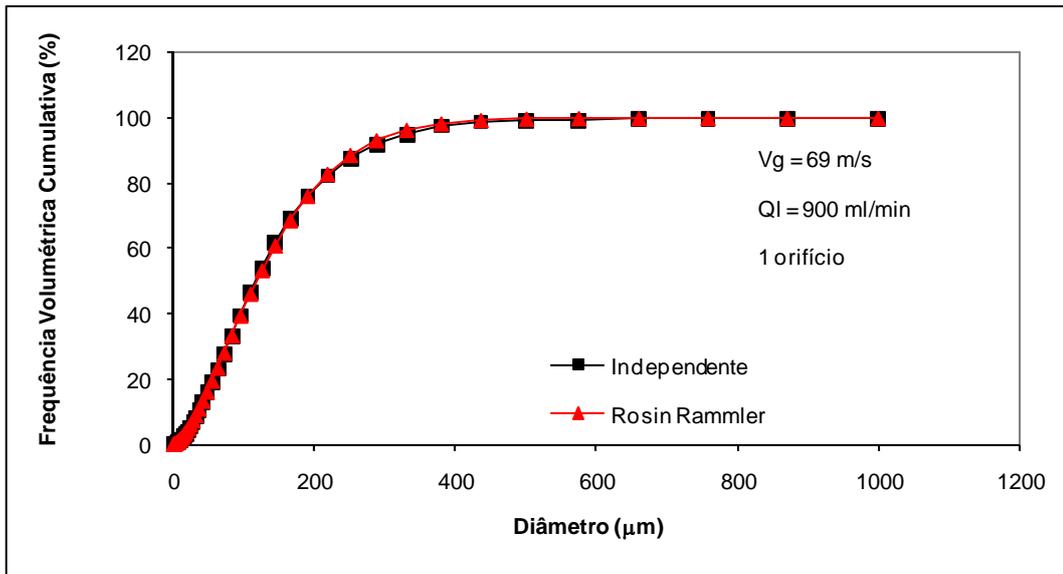


Figura 4.3 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 900$ mL/min, 1 orifício e $x = 120$ mm

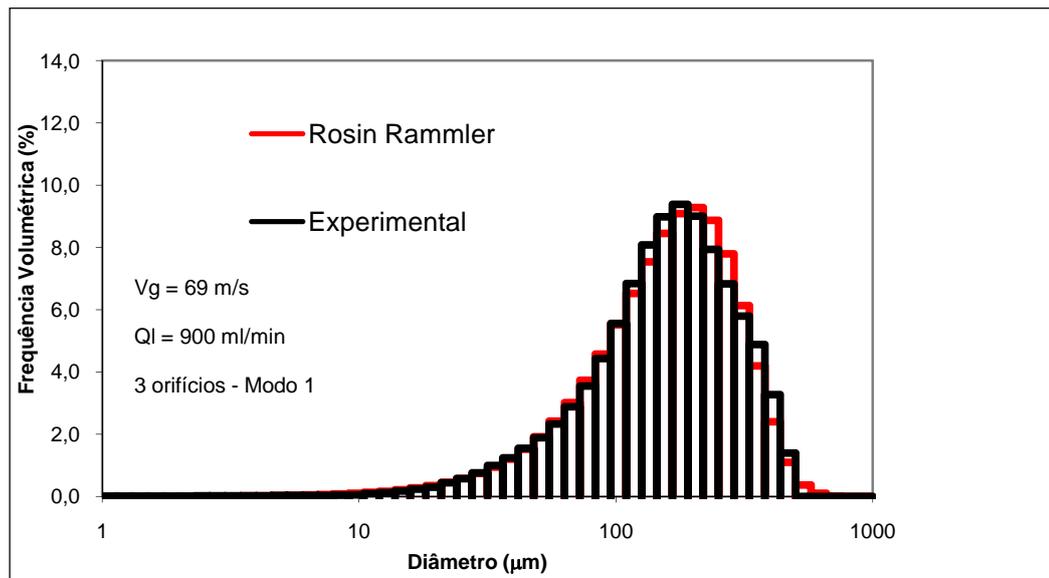
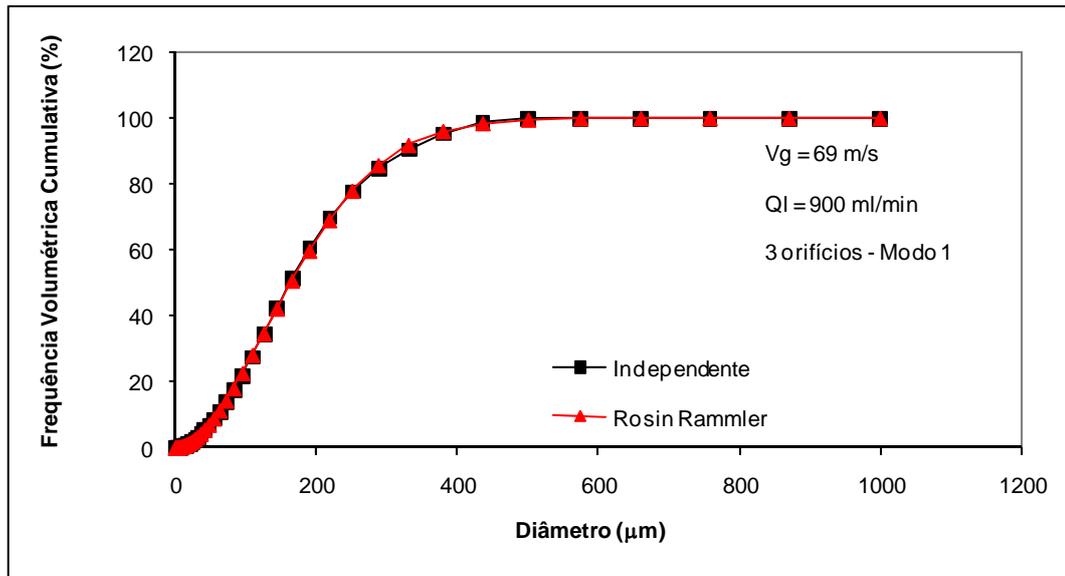


Figura 4.4 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69 \text{ m/s}$, $Q_l = 900 \text{ mL/min}$, 3 orifícios – Modo 1 e $x = 120 \text{ mm}$.

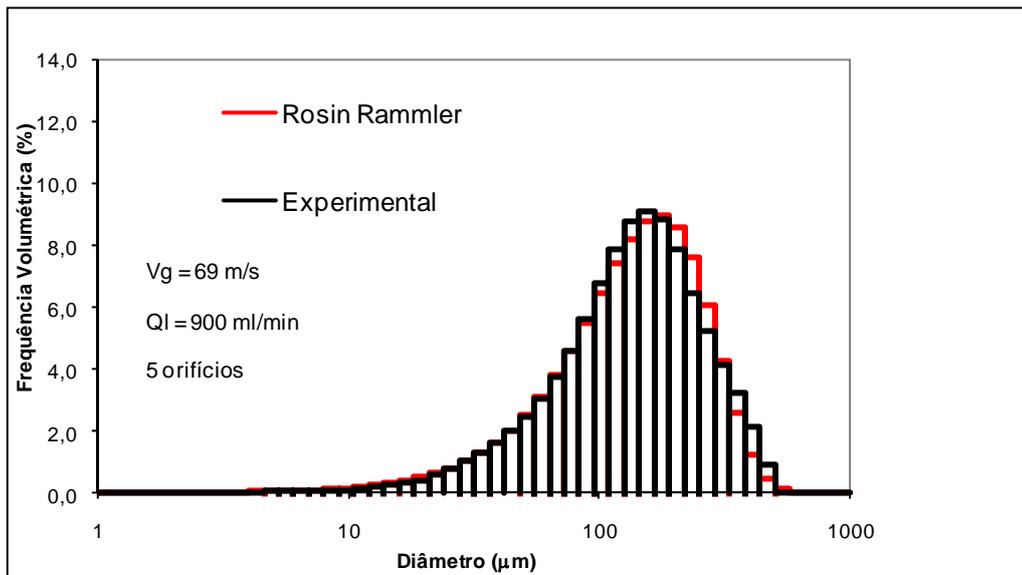
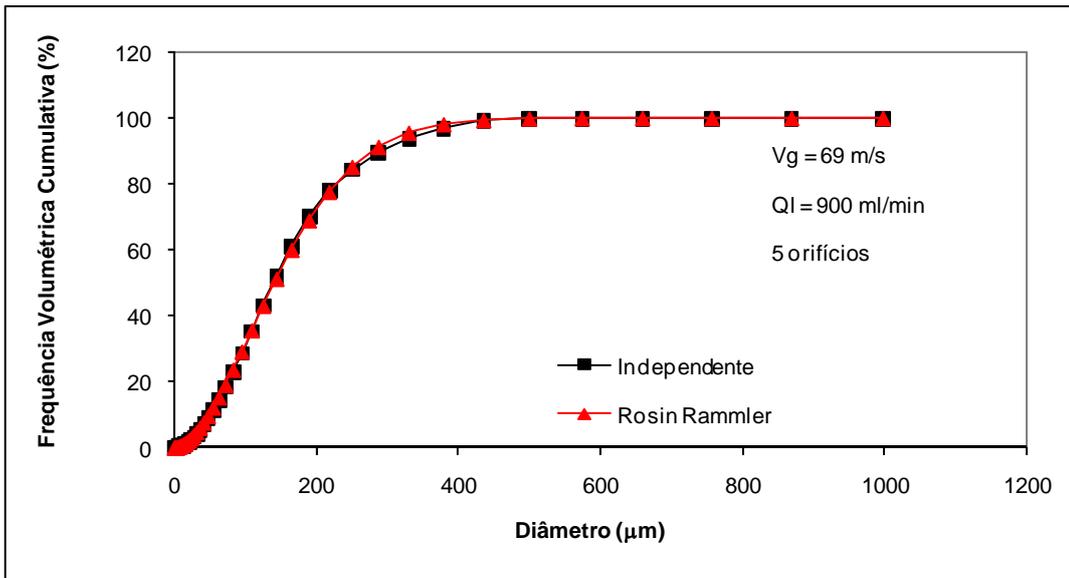


Figura 4.5 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69 \text{ m/s}$, $Q_l = 900 \text{ mL/min}$, 5 orifícios e $x = 120 \text{ mm}$.

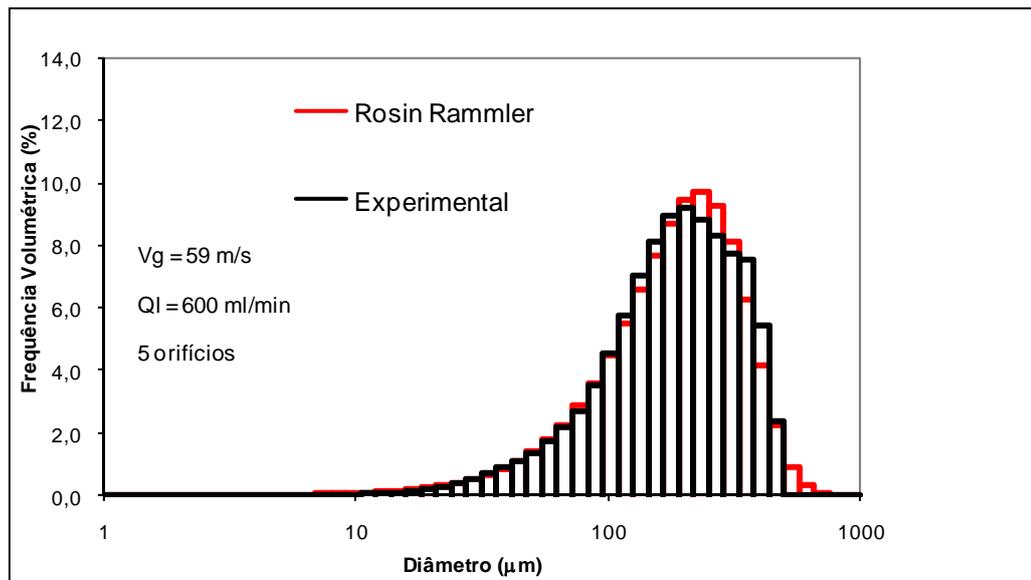
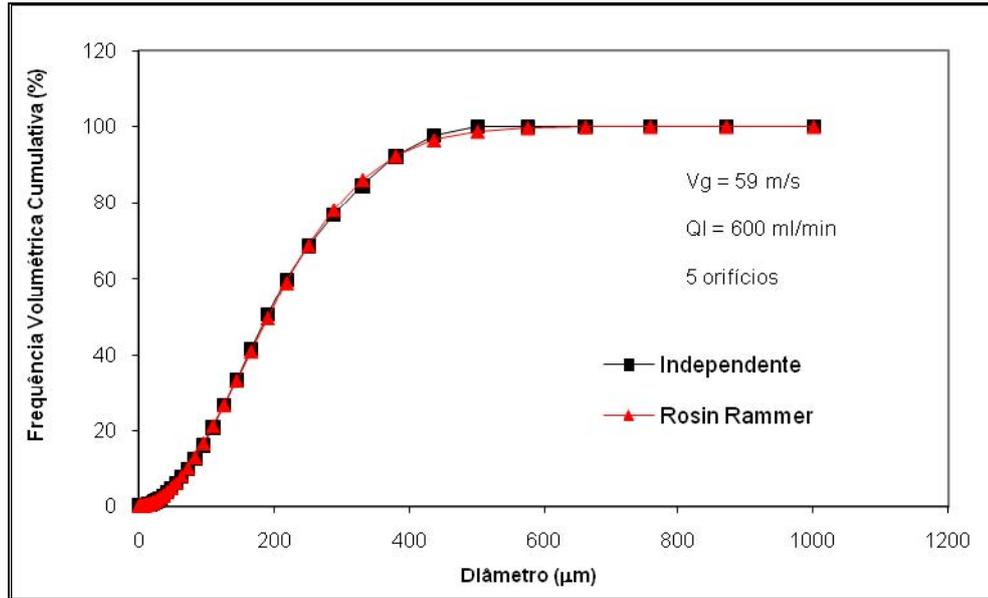


Figura 4.6 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min}$, 5 orifícios e $x = 120 \text{ mm}$.

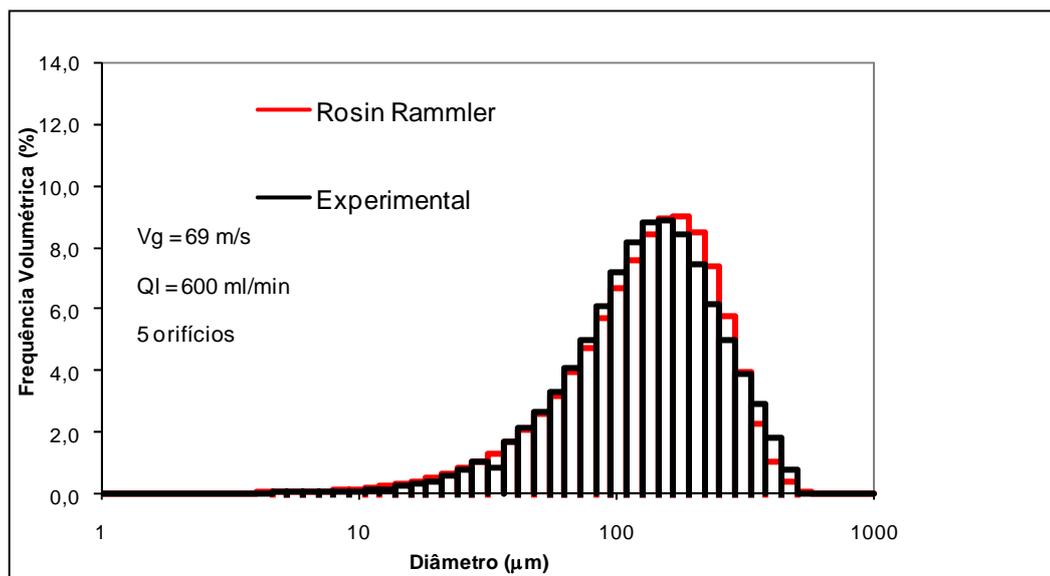
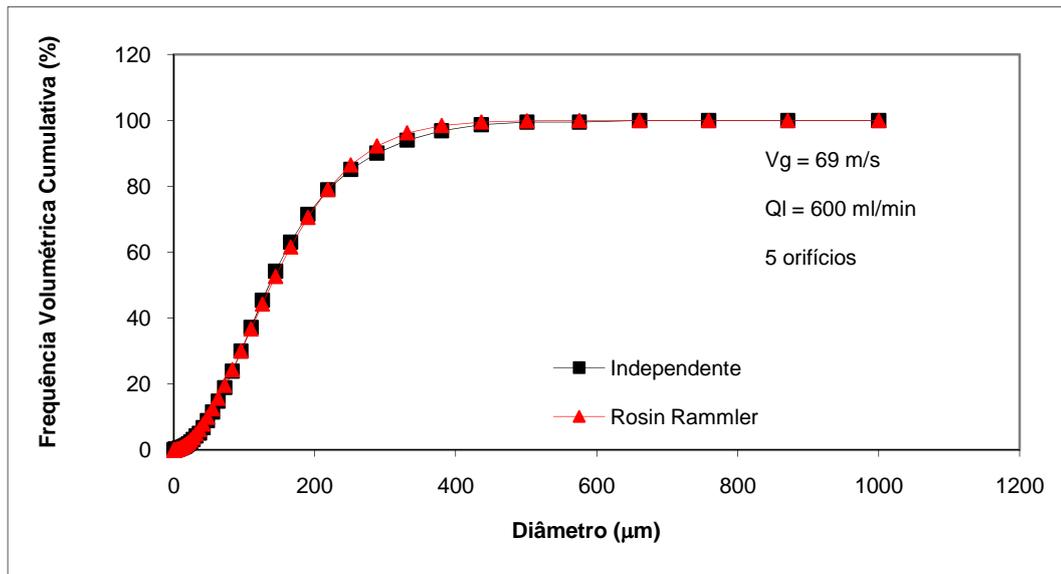


Figura 4.7 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69$ m/s, $Q_l = 600$ mL/min, 5 orifícios e $x = 120$ mm.

Em relação ao número de orifícios de injeção de líquido, observou-se que para as injeções por mais de um orifício os histogramas apresentaram distribuições não muito diferentes, independentemente da vazão de líquido. No entanto, a injeção através de um orifício apresentou um maior espalhamento para a maior vazão de líquido (900 mL/min), apresentando maior quantidade de gotas na região de diâmetros menores. Isto pode ser resultado da grande penetração do jato nessa condição operacional, já que uma grande quantidade de líquido pode ser perdida para a parede inferior do lavador, sugerindo assim, que somente as gotas menores fluem no centro da garganta.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os histogramas e curvas cumulativas para a injeção através de cinco orifícios para diferentes velocidades do gás. Pode-se observar que ocorre a diminuição do tamanho de gotas com o aumento da velocidade do gás. Esse comportamento foi observado para a maioria das configurações de injeção de líquido. Tal comportamento pode ser melhor visualizado na Figura 4.8.

4.1.2. Análise dos diâmetros médios variando as condições operacionais

A Figura 4.8 mostra a influência da velocidade do gás no tamanho das gotas geradas na garganta do lavador Venturi, os gráficos para as medidas feitas nas posições axiais referentes a 180 e 240 mm podem ser vistos no Apêndice A, Figuras A4 e A5.

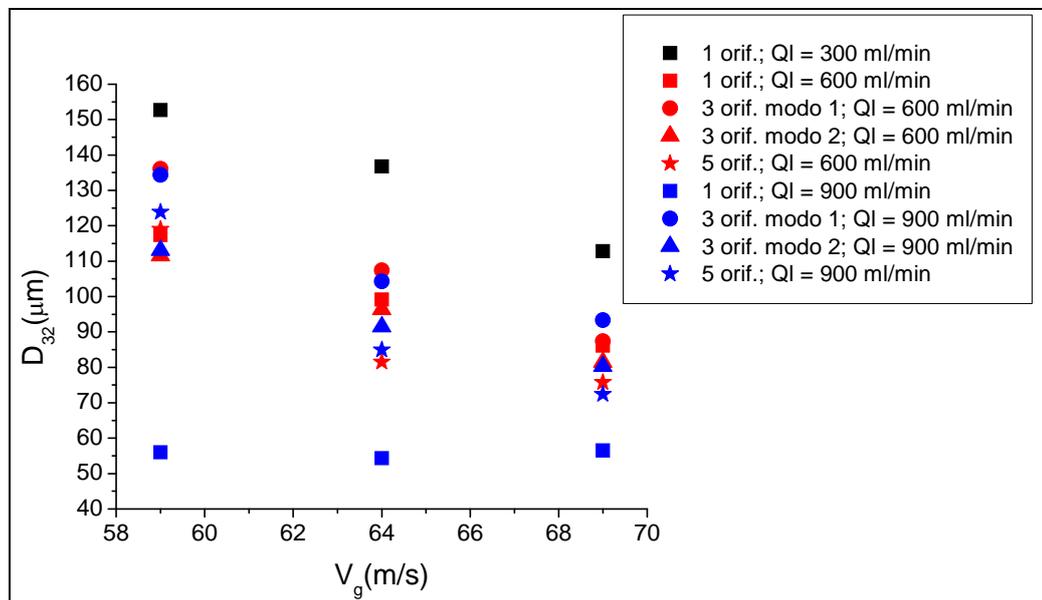


Figura 4.8 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da velocidade do gás para as diferentes vazões de líquido e números de orifícios de injeção de líquido, para $x = 120$ mm.

Independentemente da posição axial em que foi realizada a medida de tamanho de gota e da configuração de injeção do líquido as gotas tendem a diminuir com o aumento da velocidade do gás na garganta. Essa tendência é típica de processos de atomização e está qualitativamente de acordo com as correlações propostas por Nukiyama e Tanasawa (1938) e Boll *et al.* (1974). Isso pode ser explicado pelo fato de que com o aumento na velocidade de gás, mais energia está disponível para aumentar a área de superfície total requerida para formação de um spray mais fino (Costa *et al.*, 2004). Um comportamento atípico pode ser visto para a maior vazão de líquido (900 mL/min.) e injeção através de um orifício, já que os diâmetros das gotas ficaram praticamente constantes com o aumento da velocidade do gás.

A Figura 4.9 apresenta a influência da vazão total de líquido injetada no equipamento no tamanho da gota medida experimentalmente.

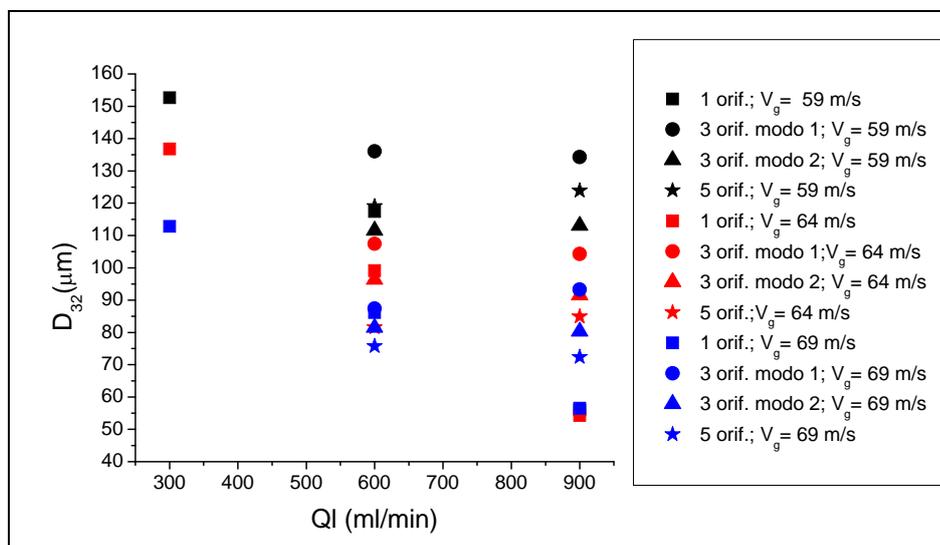


Figura 4.9 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da vazão total de líquido injetada na garganta do lavador Venturi (Ql) para as diferentes velocidades de gás e números de orifícios de injeção de líquido, para $x=120$ mm.

Através das correlações propostas por Nukiyama e Tanasawa (1938) e Boll *et al.* (1974) sabe-se que um aumento na vazão total de líquido introduzida no lavador ocasiona um aumento no tamanho da gota, já que os diâmetros das gotas são diretamente proporcionais a vazão de líquido, como pode ser visto nas equações 2.21 e 2.26. No caso da injeção através de um único orifício um comportamento contrário foi observado já que houve uma diminuição acentuada do diâmetro com o aumento da vazão total de líquido, conforme mostra a Figura 4.9. Para as demais configurações de injeção de líquido não foi possível identificar uma tendência de aumento ou queda nos tamanhos de gota. O que pode ser verificado é que o número de orifícios de injeção de líquido realmente influenciou no tamanho da gota gerada no processo de atomização e um estudo mais detalhado mostrou-se necessário.

A Figura 4.10 mostra o efeito da vazão de líquido injetada para os três comprimentos de garganta. Pode-se notar que houve uma influência significativa da vazão de líquido no caso da injeção através de um único orifício. Já para as injeções de líquido realizadas através de mais de um orifício essa influência foi bem pequena sendo que a variação dos diâmetros representativos não foi muito clara. Dependendo da configuração de injeção de líquido ocorreu o aumento ou diminuição dos diâmetros de Sauter. Tal comportamento também foi encontrado para as demais posições axiais (Figuras A8 e A9).

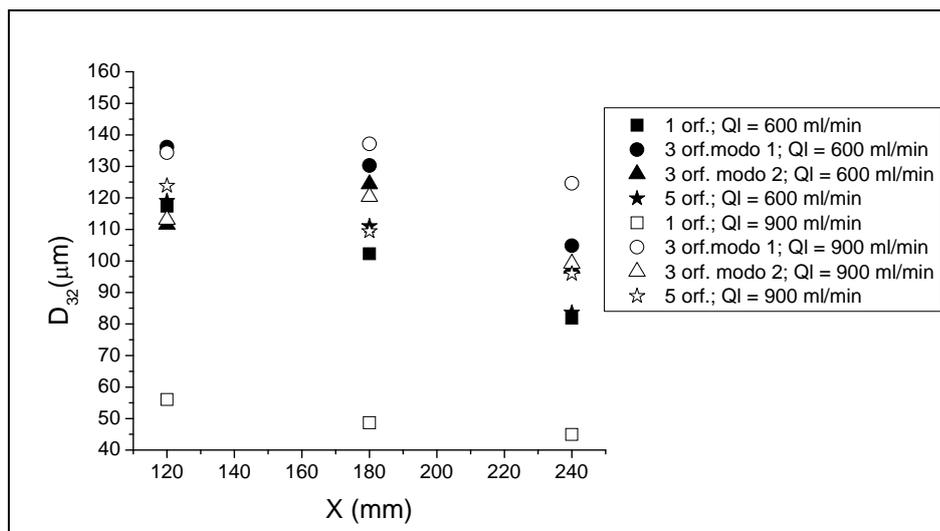


Figura 4.10 – Diâmetro de Sauter (D_{32}) em função da posição axial para as diferentes vazões de líquido injetadas na garganta do lavador e diferentes números de orifícios de injeção de líquido, para $V_g = 59$ m/s.

De uma forma geral, através dos testes preliminares pôde-se observar que a configuração e o número de orifícios em funcionamento afetaram significativamente o tamanho da gota gerada dentro do lavador Venturi. A razão L/G mostrou ter um comportamento diferenciado, principalmente quando comparado ao previsto pelas correlações disponíveis para previsão de tamanho de gotas em lavadores Venturi. Os estudos referentes a tamanhos de gotas e filme líquido em lavadores não levam em conta o número de orifícios de injeção de líquido. Surgindo assim, a necessidade de um estudo mais detalhado a respeito. Desta forma, foi construído um novo lavador Venturi, com quatro orifícios de injeção de líquido construídos em latão, como descrito nos Materiais e Métodos. Neste novo lavador foi tomado todo o cuidado para que os orifícios possuíssem exatamente as mesmas dimensões, principalmente em relação ao diâmetro de saída do líquido. Os resultados experimentais obtidos para este novo lavador podem ser vistos a seguir.

4.2. Testes - Novo lavador Venturi

Os resultados aqui apresentados são referentes ao novo lavador Venturi construído e montado horizontalmente possuindo 4 injeções de líquido e garganta de 40x27mm. Os resultados apresentados incluem as imagens dos múltiplos jatos, medidas de tamanho de gotas e fração de filme líquido para diferentes configurações de injeção de líquido, vazão de líquido, velocidade do ar na garganta do lavador e distâncias axiais.

4.2.1. Imagens dos jatos líquidos

A penetração do jato líquido é um fator importante na distribuição do líquido no interior do equipamento. Dependendo da penetração do jato pode-se ter uma cobertura melhor ou pior de líquido na garganta do lavador. Estudos sobre eficiência de coleta em lavador Venturi constataram que uma boa distribuição do líquido no interior do lavador é fundamental para um bom desempenho de coleta do equipamento. As imagens dos jatos no interior da garganta do lavador apresentadas nas Figuras 4.11 a 4.19 possibilitaram a visualização de como as diferentes penetrações dos jatos influenciam na distribuição do líquido no interior do lavador.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a penetração do jato através da injeção de líquido por um único orifício transversal a corrente de gás, mantendo a velocidade de gás constante e variando a vazão do líquido injetado na garganta do lavador. Através das figuras pode-se verificar que a atomização não ocorre em um único ponto do jato, evidenciando um desprendimento contínuo de massa ao longo do mesmo e que o desprendimento das gotas inicia-se a uma pequena distância da penetração do jato na garganta do Venturi. Estas observações também foram evidenciadas por Gonçalves (2000). O fato da atomização não se iniciar em um único ponto do jato contraria as hipóteses de alguns autores (Taheri e Sheih, 1975; Fathikalajahi *et al.*, 1995; Fathikalajahi, 1996; Viswanathan, 1997, Ananthanarayanan e Viswanathan, 1998; Ananthanarayanan e Viswanathan, 1999; Viswanathan e Shyan, 2000) que adotam a hipótese de um único ponto de atomização para simplificação na predição de modelos de distribuição de gotas.

Através das Figuras 4.11 e 4.12 também se pode notar que o aumento da vazão de líquido proporcionou o aumento da velocidade do jato e conseqüentemente maiores penetrações do jato na garganta do lavador, já que a penetração do jato é diretamente proporcional à velocidade do mesmo, como mostrado nas equações 2.2 e 2.3. Com o aumento na penetração do jato líquido ocorreu uma melhor cobertura de garganta o que é interessante, visto que uma melhor distribuição do líquido no interior do equipamento proporciona uma maior área de contato líquido-partícula a ser coletada, aumentando assim a eficiência de coleta.



Figura 4.11 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 300$ mL/min.
($V_j = 6,37$ m/s e $\ell^{**} = 10,29$ mm)



Figura 4.12 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min.
($V_j = 12,74$ m/s e $\ell^{**} = 20,58$ mm)



Figura 4.13 – Imagem do jato para injeção através de 1 orifício $V_g = 74$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min.
($V_j = 12,74$ m/s e $\ell^{**} = 16,41$ mm)

Comparando a Figura 4.12 com a Figura 4.13 é possível verificar que o aumento na velocidade do gás proporcionou o maior achatamento do jato líquido, ocasionado pelo aumento da força de arraste conseqüente do aumento da velocidade, gerando assim jatos menos penetrantes para uma mesma vazão de líquido.

A Figura 4.14 mostra as penetrações dos jatos para a injeção de líquido por 2 orifícios (modo 1) sendo a vazão total de líquido injetada na garganta do lavador Venturi igual

600 mL/min., o que representa 300 mL/min. em cada orifício de injeção. Já a Figura 4.15 e a Figura 4.16 mostram as penetrações para a vazão total de líquido de 1100 mL/min. (550 mL/min. em cada orifício de injeção).

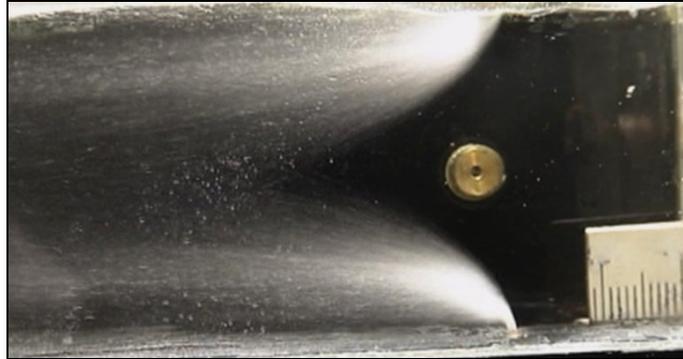


Figura 4.14 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min.

$$(V_j = 6,37 \text{ m/s e } \ell^{**} = 5,15 \text{ mm})$$



Figura 4.15 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 1100$ mL/min.

$$(V_j = 11,68 \text{ m/s e } \ell^{**} = 19,08 \text{ mm})$$

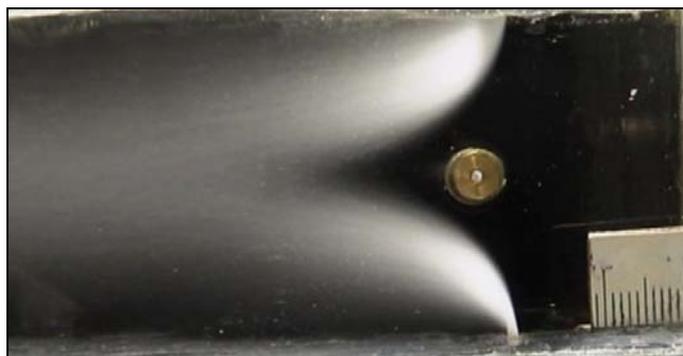


Figura 4.16 – Imagem dos jatos para injeção através de 2 orifícios $V_g = 74$ m/s e $Q_l = 1100$ mL/min.

$$(V_j = 11,68 \text{ m/s e } \ell^{**} = 15,22 \text{ mm})$$

Através das Figuras 4.14 e 4.15 fica nítida a interação entre os jatos com o aumento da vazão de líquido. Na Figura 4.14 pode-se notar que os jatos comportam-se de forma praticamente individuais. Sendo que as baixas penetrações dos jatos na garganta fazem com que eles fiquem praticamente paralelos à corrente de ar. No entanto, com o aumento da vazão

de líquido, Figura 4.15, pode-se constatar o choque frontal entre os jatos e a interação ocorrida entre os mesmos, ocasionando uma grande concentração de líquido fluindo no centro da garganta do lavador.

Já na Figura 4.16 o aumento da velocidade do gás novamente proporcionou o maior achatamento dos jatos líquidos e desta forma uma menor interação entre os mesmos quando comparados com a situação de menor velocidade do gás (Figura 4.15).

A Figura 4.17 mostra a imagem dos jatos originados da injeção de líquido através de 3 orifícios para a menor vazão de líquido injetada na garganta do lavador Venturi, 300 mL/min, o que representa 100 ml/min em cada orifício de injeção. Na Figura 4.17 pode-se verificar principalmente através do orifício que está localizado na parede lateral da garganta, uma grande quantidade de líquido fluindo na parede do lavador. Esse líquido fluindo na parede é resultado da pequena penetração do jato na garganta do lavador. Isto faz com que ocorra uma menor formação de gotas devido à menor interação jato-corrente de ar, ocasionada nesta condição experimental. O filme afeta o desempenho de coleta do lavador, uma vez que possui área superficial por volume menor do que as gotas, diminuindo assim a eficiência de coleta do equipamento, além de proporcionar uma maior perda de carga.

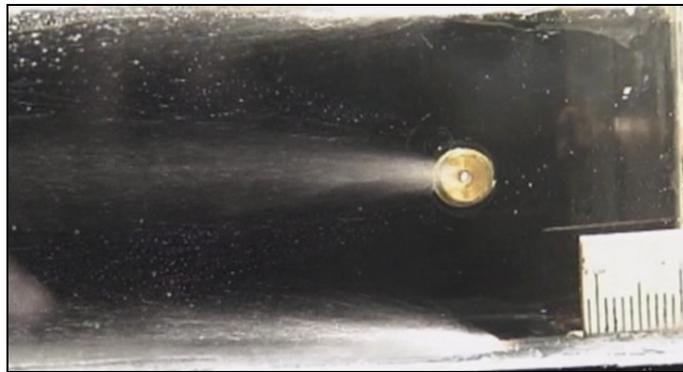


Figura 4.17 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 300$ mL/min.

$$(V_j = 2,12 \text{ m/s e } \ell^{**} = 3,43 \text{ mm})$$



Figura 4.18 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 600$ mL/min.

$$(V_j = 4,25 \text{ m/s e } \ell^{**} = 6,86 \text{ mm})$$

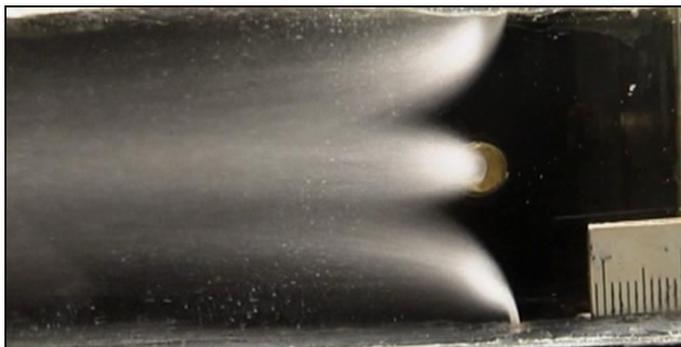


Figura 4.19 – Imagem dos jatos para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s e $Q_l = 1200$ mL/min.

$$(V_j = 8,49 \text{ m/s e } \ell^{**} = 13,72 \text{ mm})$$

Com o aumento da vazão de líquido (Figuras 4.18 e 4.19) e conseqüente aumento da penetração do jato, ocorreu uma maior interação jato-ar, proporcionando uma melhora no processo de atomização e também a diminuição do filme escoando na garganta do equipamento.

4.2.2. - Variação do diâmetro médio de Sauter para as diferentes condições experimentais

Existem vários fenômenos que podem causar a variação de diâmetro das gotas formadas no processo de atomização dentro de um lavador Venturi, tais como: processos de atomização diferenciados (dependendo da condição experimental adotada); coalescência das gotas (fenômeno que faz com que duas gotas se choquem para gerar uma única gota); atomização secundária (quando uma gota grande ou ligamentos provenientes do processo de atomização geram gotas de tamanhos menores) e a deposição preferencial de alguns tamanhos de gotas nas paredes do equipamento. Com o intuito de compreender quais os fenômenos que estão envolvidos no lavador aqui estudado foram medidos os tamanhos de gotas para diferentes condições experimentais.

4.2.2.1 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a posição axial

Os tamanhos de gotas foram medidos para diferentes posições ao longo da garganta do lavador. Pode-se verificar através das Figuras 4.20 a 4.24, que independentemente da configuração de injeção, da vazão do líquido e das condições de velocidade do gás, o tamanho das gotas medidas experimentalmente foram maiores para a menor distância axial. Já para as medidas realizadas a 180 e 240 mm do ponto de injeção do líquido, os tamanhos médios de Sauter ficaram próximos. Essa variação deve-se ao fato de que no processo de atomização ocorre inicialmente a formação de ligamentos e gotas maiores, que posteriormente rompem-se formando gotas de tamanhos menores. Assim, para a menor distância axial o processo de

atomização aparenta ainda não estar completo. Já para as maiores distâncias os tamanhos de gotas próximos indicam que, para as condições experimentais analisadas nas Figuras 4.20 a 4.24, o processo de atomização estava mais estável.

Através das Figuras 4.20 a 4.24 pode-se notar que independentemente da configuração de injeção do líquido e da velocidade do gás na garganta do lavador, a tendência das gotas foi de diminuir com o aumento da distância axial a partir do ponto de injeção do líquido. Isso sugere que o fenômeno da coalescência não mostrou influencia significativa no tamanho da gota medida ao longo do equipamento, até a distância de 240 mm da injeção do líquido. Tal diminuição também foi evidenciada por Kihm *et al* (1995). Já no estudo realizado por Gonçalves (2000) em um lavador Venturi circular, o autor evidenciou um aumento no tamanho da gota com a posição axial. A faixa de estudo da razão L/G foi maior que a adotada neste estudo o que justificaria o aumento dos tamanhos das gotas, já que a coalescência é favorecida quando há maiores concentrações de líquido. Com menores razões L/G a coalescência torna-se menos provável.

Em virtude da maior estabilização no processo de atomização para as medidas realizadas com as maiores distâncias do ponto de injeção do líquido os resultados seguintes, em sua maioria, serão analisados para as distâncias $x = 180$ mm e 240 mm.

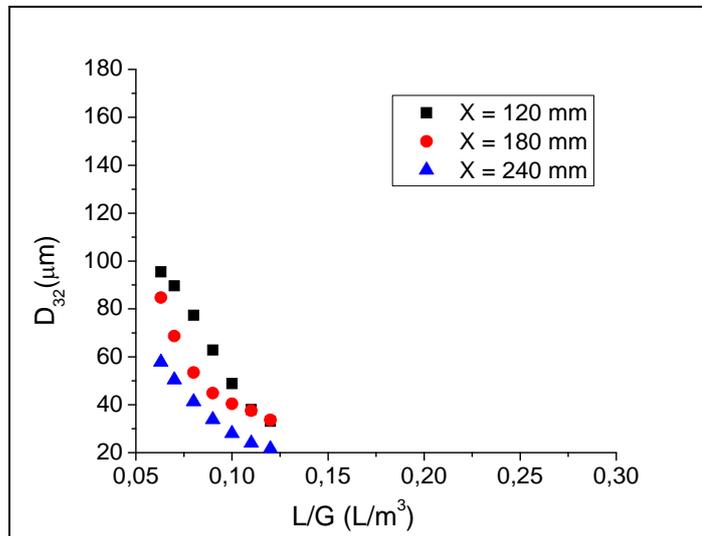


Figura 4.20 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 1 orifício, $V_g = 74$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).

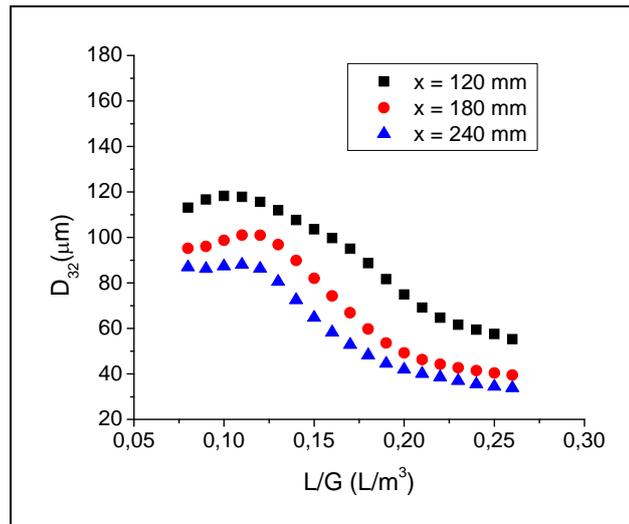


Figura 4.21 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 2 orifícios modo 1, $V_g = 64$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).

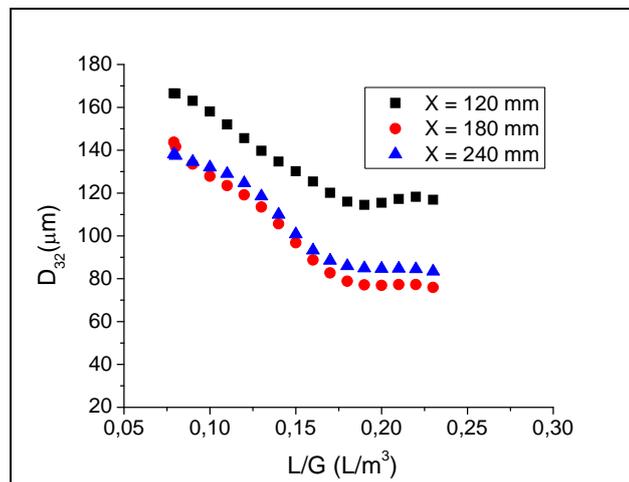


Figura 4.22 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 2 orifícios modo 2, $V_g = 59$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).

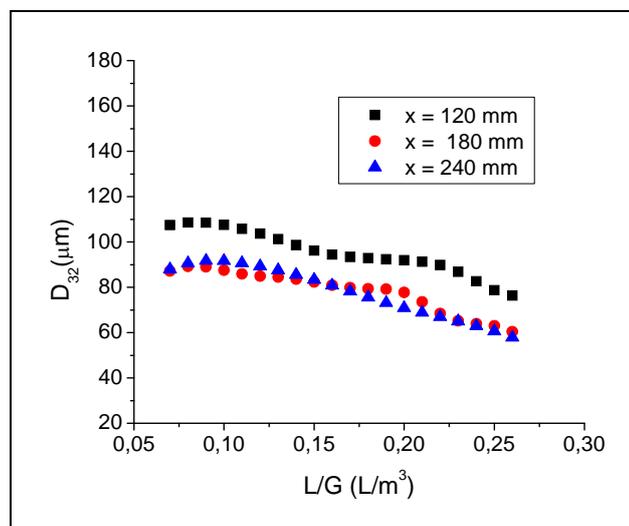


Figura 4.23 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 3 orifícios, $V_g = 69$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).

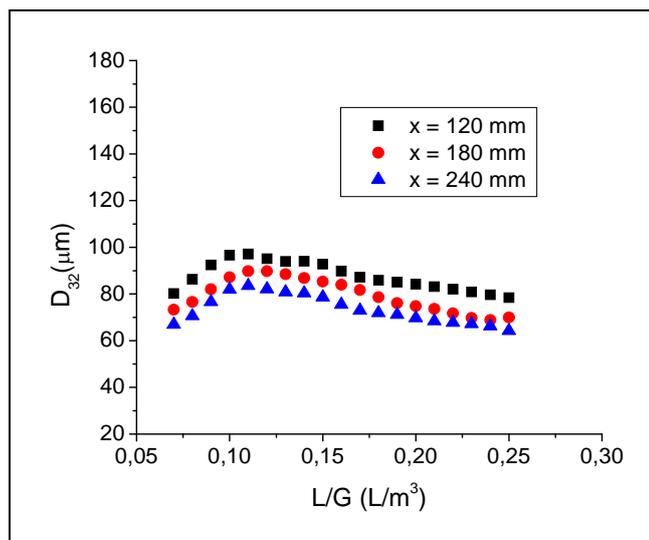


Figura 4.24 - Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para a injeção de líquido através de 4 orifício, $V_g = 74$ m/s e diferentes posições axiais ao longo da garganta do lavador (x).

Na Figura 4.20 pode-se verificar que para a injeção por único orifício no novo lavador, a razão L/G foi menor que a alcançada pela mesma configuração de injeção utilizando o lavador antigo, Figura 4.10. A vazão máxima atingida para o novo lavador com a injeção por 1 orifício foi de 600 mL/min enquanto no lavador antigo alcançava-se vazões de 900 mL/min, os gráficos comparando as duas configurações para os diferentes lavadores podem ser vistos no Apêndice C. Os tamanhos de gotas medidos para o novo lavador também foram bem menores que as medidas realizadas para a mesma configuração de injeção nos testes preliminares. Outra diferença é o fato de que no antigo lavador, quando se injetava o líquido por mais de um orifício e com a menor vazão de líquido (300 mL/min), o medidor de gotas Malvern Spraytec não conseguia detectar as gotas e efetuar as medidas de tamanho, isto sugere que os jatos apresentavam penetração insuficiente na garganta do lavador, impossibilitando que as gotas escoassem pela linha central da garganta e assim fossem detectadas pelo medidor de gotas. Já no novo lavador este problema não foi detectado, sendo possível realizar medidas de tamanhos para a menor vazão de injeção.

As diferentes vazões alcançadas e os diferentes tamanhos de gotas indicam que provavelmente o diâmetro do orifício do antigo lavador e o fato dele ser feito diretamente no acrílico podem estar ocasionando estas diferenças. Os orifícios de injeção do antigo lavador foram feitos inicialmente com 1 mm de diâmetro, entretanto, as altas velocidades de injeção do líquido e o uso contínuo do lavador para testes experimentais podem ocasionar o desgaste e aumento no tamanho do orifício de injeção, principalmente quando ele é feito diretamente no acrílico. Segundo o estudo realizado por Kihm *et al.* (1995) um pequeno aumento no

diâmetro do orifício de injeção de líquido pode causar um aumento significativo no tamanho da gota medida. Essas variações sugerem que os cuidados na confecção dos orifícios para o novo lavador foram válidas.

4.2.2.2 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a razão L/G (L/m^3)

A razão L/G é um parâmetro muito importante em lavadores e geralmente incluído nas correlações para predição de tamanhos de gotas em lavadores Venturi. A influência da razão L/G no tamanho das gotas geradas na garganta do lavador Venturi podem ser vistas nas Figuras 4.25 a 4.28 para diferentes configurações de injeção e velocidades do gás. Através destas figuras pode-se verificar que independentemente da configuração e da velocidade do gás o tamanho da gota gerada dentro do lavador diminui com o aumento da razão L/G. Este comportamento mostrou-se semelhante ao observado nos testes preliminares, principalmente para a configuração de injeção por 1 orifício. Isso indica que a vazão de líquido e conseqüente aumento na velocidade do jato, está influenciando significativamente no tamanho da gota formada, o que pode ser confirmada através da Figura 4.29 (a) e (b).

As correlações disponíveis na literatura para predição de tamanho de gotas em lavadores Venturi prevêm um comportamento diferente do aqui apresentado em relação à razão L/G. Nestas correlações um aumento na razão L/G faz com que o tamanho da gota aumente de forma não muito acentuada. No entanto, Kihm *et al.* (1995) e Wu *et al.* (1998), observaram comportamento semelhante ao apresentado neste estudo realizando medidas de tamanho de gotas originada de um jato de água injetado transversalmente a uma corrente de ar. Costa *et al.* (2004) e Silva *et al.* (2008) estudando tamanhos de gotas em baixas razões L/G (0,01 a 0,17 L/m^3 e 0,03 a 0,09 L/m^3 , respectivamente) também relataram a diminuição do tamanho da gota com o aumento da vazão de líquido. Já Viswanathan *et al.* (2005) operando um lavador Venturi com razão L/G na faixa de 0,4 a 1,8 L/m^3 , verificaram que o diâmetro da gota aumentava com o aumento da razão L/G. É necessário ressaltar que neste estudo a água era injetada no lavador através de 34 orifícios perpendiculares a corrente de ar. Segundo Silva *et al.* (2008) este método de injeção por inúmeros orifícios se aproxima da técnica de injeção por filme líquido.

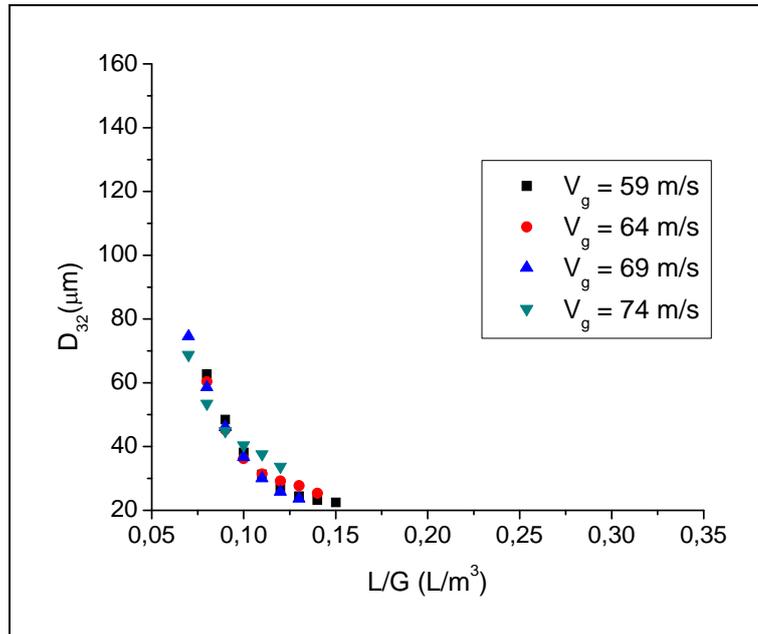


Figura 4.25 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m³) para 1 orifício, x = 180 mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.

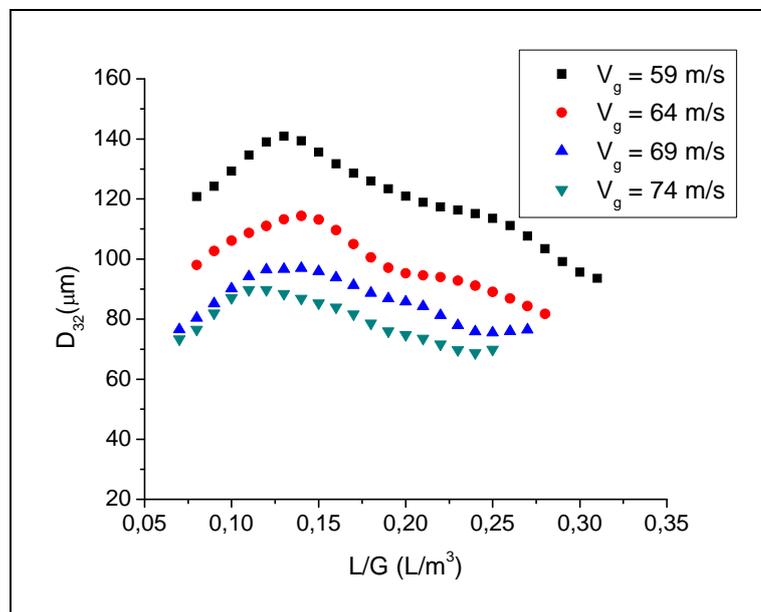


Figura 4.26 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m³) para 4 orifícios, x = 180 mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.

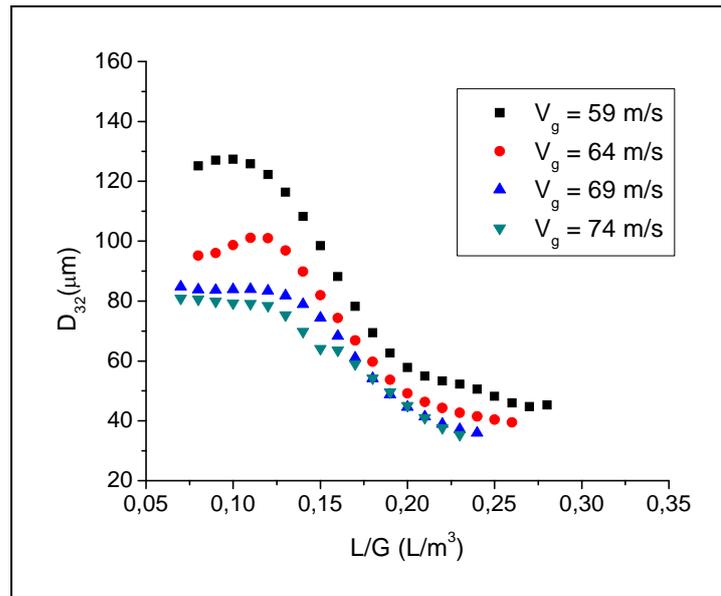


Figura 4.27 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 2 orifícios modo 1, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.

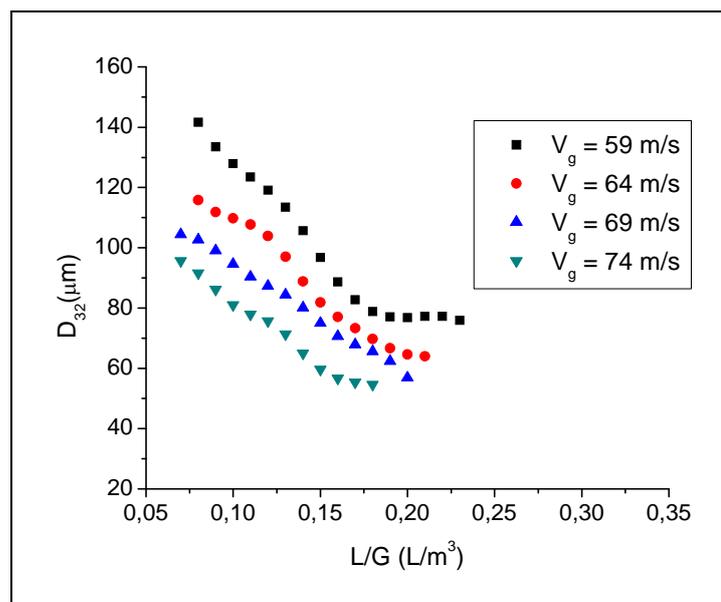


Figura 4.28 – Diâmetro de Sauter em função de L/G (L/m^3) para 2 orifícios modo 2, $x = 180$ mm e diferentes velocidades do gás na garganta do lavador.

4.2.2.3 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a velocidade do jato (V_j) e a velocidade do gás na garganta do lavador (V_g)

A Figura 4.29 apresenta a variação do diâmetro médio de Sauter com a velocidade do jato. A diminuição do tamanho médio da gota com o aumento da velocidade do jato pode ser explicada devido ao aumento da interação entre a o jato e a corrente de ar em alta velocidade. O aumento da velocidade do jato ocasiona a sua maior penetração no interior do lavador. A influência do aumento da vazão de líquido na penetração do jato líquido pode ser visualizada

através das imagens dos jatos apresentadas nas Figuras 4.11 a 4.19. Segundo o mecanismo de ruptura do jato líquido descrito por Wu *et al.* (1997), existe o que os autores denominaram de ruptura de superfície do líquido a qual ocasiona a formação de pequenas gotas que se desprendem diretamente da superfície do jato, devido ao atrito aerodinâmico. Segundo os autores, o mecanismo de ruptura de superfície torna-se predominante com o aumento da velocidade do jato, ocasionando o desprendimento de um número significativo de pequenas gotas. Desta forma, jatos como os apresentados nas Figuras 4.12, 4.15 e 4.19, que apresentam maiores velocidade e penetrações do jato, apresentaram uma melhora no processo de atomização com a geração de gotas menores, além de uma nuvem de gotas melhor distribuída no interior do equipamento. Costa *et al.* (2006) estudando a influência do ângulo de injeção do líquido em uma corrente de ar também evidenciou o favorecimento do processo de atomização quando o corpo do jato ficava mais exposto a corrente de ar em alta velocidade o contrário ocorria quando o jato ficava praticamente paralelo a corrente de ar.

Através da Figura 4.29 também se pode evidenciar que para as maiores velocidades do jato houve uma proximidade no tamanho das gotas, a qual seria ocasionada pela geração de um grande número de pequenas gotas. Segundo Lefebvre (1989) na injeção de líquido através de orifícios planos, a velocidade do gás é importante porque o processo de atomização não é terminado tão logo o jato deixe o orifício. Ao contrário, o processo continua no meio ao redor até que o tamanho da gota caia a um valor crítico abaixo do qual nenhuma desintegração adicional pode ocorrer. Para um dado líquido este tamanho de gota crítico não depende da velocidade absoluta do jato líquido, mas da sua velocidade relativa com o gás ao redor do jato. Se ambos estão se movendo na mesma direção, a penetração é aumentada, a atomização é retardada, e o diâmetro médio da gota é aumentado. Quando os movimentos são em direções opostas, a penetração é diminuída, o ângulo cônico ampliado, e a qualidade da atomização é melhorada.

O aumento inicial observado para as menores velocidades dos jatos na injeção através de 4 orifícios, pode ser justificado pelo fato de que, nesta configuração ocorrem as menores penetrações dos jatos líquidos. Neste caso, os jatos estão praticamente paralelos à corrente de ar sendo que o pequeno aumento da vazão de líquido proporcionou o aumento do diâmetro da gota, até a velocidade do jato de 3 m/s, indicando que o processo de atomização foi desfavorecido até este ponto. No entanto, com o aumento contínuo da vazão de líquido e conseqüente aumento da velocidade do jato ocorreu a melhora na atomização com a geração de gotas menores.

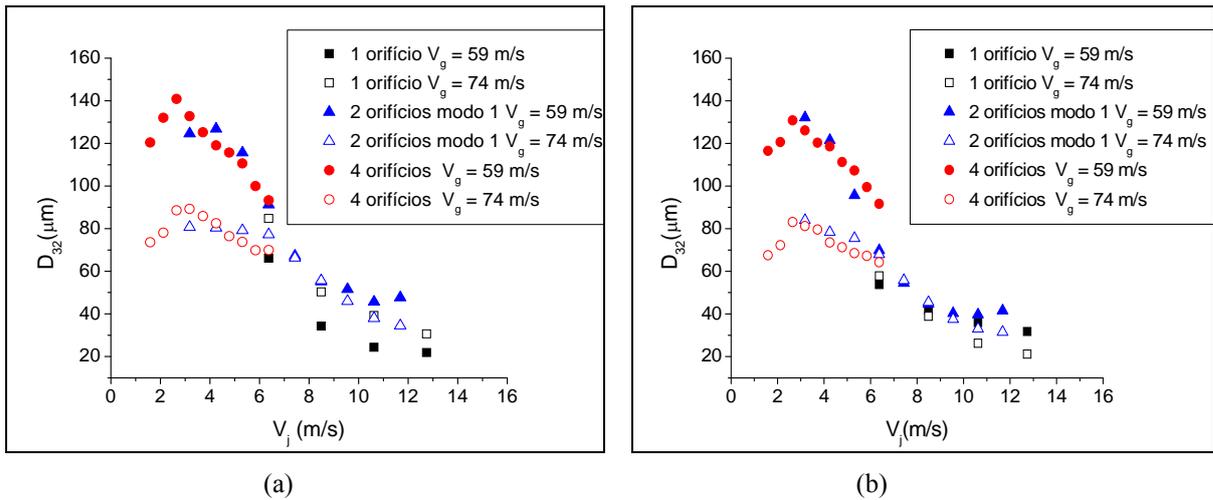


Figura 4.29 – Variação do diâmetro médio de Sauter em função da velocidade do jato. (a) $x = 180$ mm e (b) $x = 240$ mm

A Figura 4.30 e a Figura 4.31 comparam a influência das diferentes velocidades do gás no tamanho da gota. Como pode ser observado nas Figuras 4.30 e 4.31 o aumento na velocidade do gás fez com que o tamanho médio da gota diminuísse independentemente da vazão total de líquido injetada na garganta do lavador e da configuração de injeção do líquido. Este comportamento já era esperado visto que se trata de um comportamento típico no processo de atomização, já que o aumento na velocidade do gás proporciona o aumento das forças aerodinâmicas atuando no jato líquido.

Através das Figuras 4.25 a 4.28 também se pode verificar que dependendo do número de orifícios em funcionamento a velocidade do gás exerceu influência maior ou menor no tamanho da gota formada. Na Figura 4.25 a velocidade do gás mostrou pouca influência para a configuração de 1 orifício, os valores dos diâmetros das gotas ficaram bem próximos para a faixa de velocidade estudada. Já para as demais configurações (Figuras 4.26, 4.27 e 4.28) as maiores gotas foram obtidas para a menor velocidade do gás e com o aumento contínuo da velocidade do gás os tamanhos das gotas foram se tornando mais próximos, como pode ser vista nas Figuras 4.26 e 4.27 para as velocidades de 69 e 74 m/s. Wu *et al.* (1998) também evidenciaram tal aproximação dos diâmetros com o aumento contínuo da velocidade do gás a qual foi associada ao favorecimento da geração de pequenas gotas proporcionado pelo aumento da velocidade do gás.

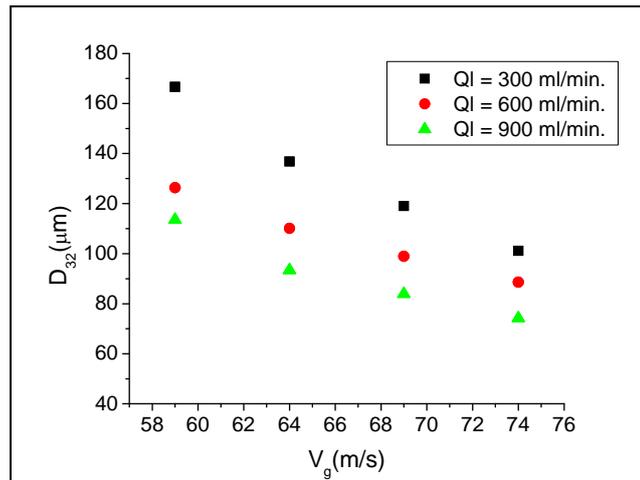


Figura 4.30 – Comparação entre as velocidades para diferentes vazões de líquido x = 180 mm por 2 orificios modo 2.

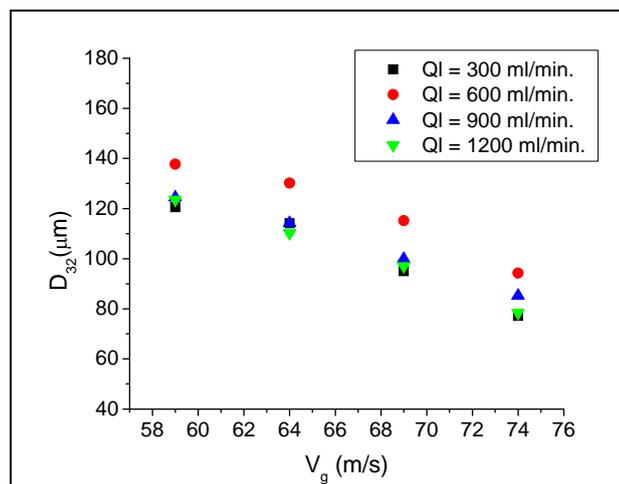


Figura 4.31 – Comparação entre as velocidades para diferentes vazões de líquido x = 180 mm por 4 orificios.

4.2.2.4 – Variação do diâmetro médio de Sauter para as diferentes configurações de injeção

A configuração de injeção do líquido também mostrou influencia significativa no tamanho da gota, como pode ser visto nas Figuras 4.25 a 4.28. Tal influência pode ser melhor visualizada na Figura 4.32 a qual compara as diferentes configurações de injeção de líquido para diferentes posições e diferentes velocidades do gás na garganta. Pode-se verificar que independentemente da posição onde foi realizada a medição e da velocidade do gás, o comportamento dos tamanhos das gotas foram semelhantes quando o líquido era injetado pelo mesmo número de orifícios. No entanto, quando se variou o número de orifícios de injeção de líquido os tamanhos das gotas adotaram comportamentos diferentes. Como pode ser visto nas

Figuras 4.15 e 4.19 o aumento da penetração do jato líquido ocasiona o choque frontal entre os jatos surgindo desta forma a dúvida se a interação entre jatos estaria afetando o tamanho da gota gerada por cada um deles.

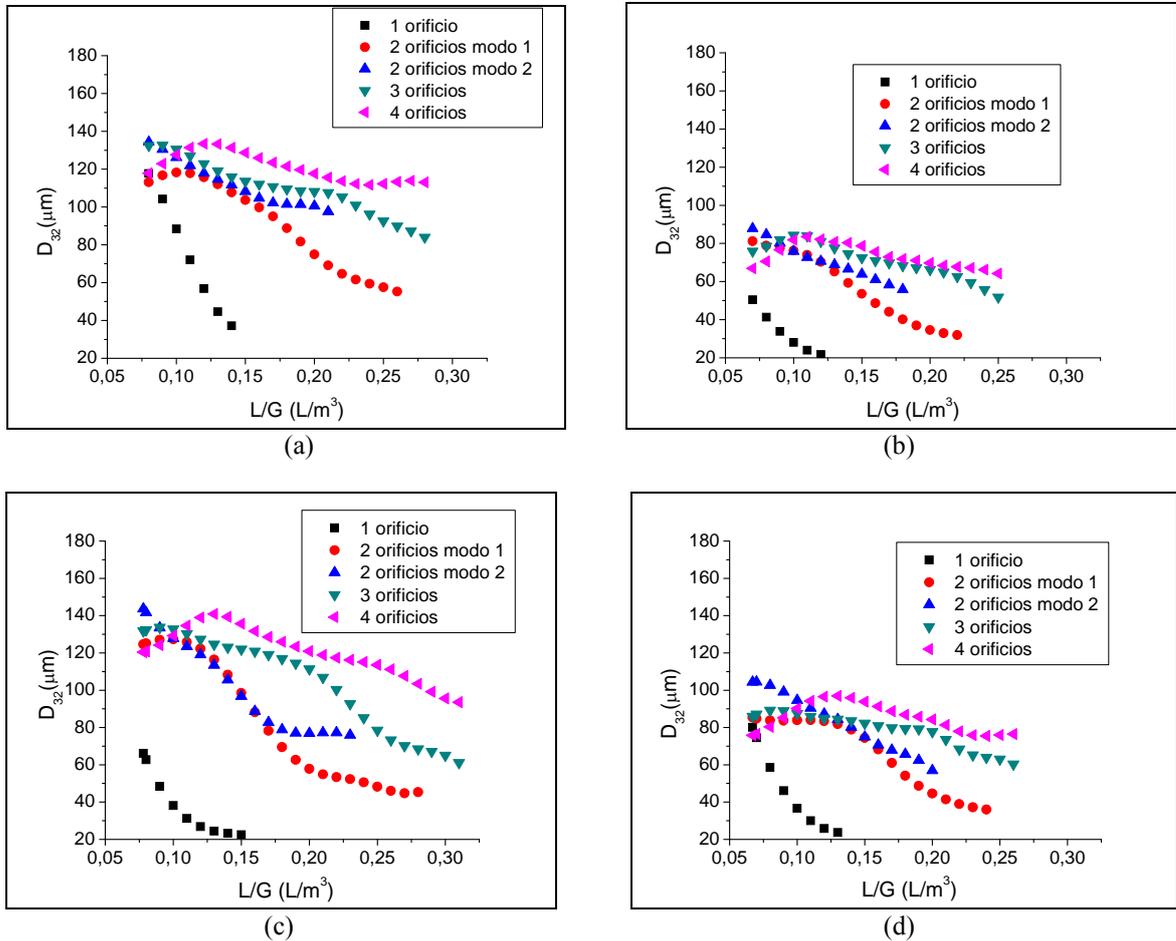


Figura 4.32 - Comparação entre as configurações. (a) $x = 120$ mm e $V_g = 64$ m/s. (b) $x = 240$ mm e $V_g = 74$ m/s
(c) $x = 180$ e $V_g = 59$ m/s (d) $x = 180$ e $V_g = 69$ m/s.

Na Figura 4.32 é possível observar que os menores tamanhos de gota foram obtidos para a injeção através de um único orifício e o aumento do número de orifícios em funcionamento fez com que os tamanhos das gotas medidas fossem aumentando. A significativa variação no tamanho das gotas com o número de orifícios de injeção de líquido pode ser associada primeiramente às diferentes velocidades dos jatos obtidas quando se varia o número de orifícios em funcionamento, já que a vazão de líquido introduzida no lavador era dividida pelo número de orifícios de injeção de líquido. Tal fato justificaria os menores tamanhos de gotas medidos para a configuração de injeção através de um orifício, já que ela possuía as maiores velocidades do jato, como pode ser visto na Figura 4.29. Além disso, na injeção por um único orifício não existia nenhum tipo de interação entre jatos ou gotas desprendidas de outros jatos. Para as demais configurações a interação entre os jatos poderia

estar interferindo no tamanho das gotas medidas dentro do lavador, tal interferência seria favorecida pelo aumento da razão L/G, já que o aumento da vazão de líquido faz com que as penetrações dos jatos tornem-se maiores ocorrendo o choque entre eles, como visto na Figura 4.15.

A possível influência da interação entre os jatos nos tamanhos das gotas pode ser melhor visualizada na Figura 4.33 e no Apêndice B (Figuras B24 a B27), nesta figura analisou-se o tamanho da gota em função da vazão em cada orifício de injeção do líquido, isto é, a vazão total de líquido dividida pelo número de orifícios em funcionamento. Através dessa figura pode-se notar que independentemente da configuração de injeção, os valores dos diâmetros das gotas ficaram próximos para as menores vazões de líquido. Independentemente da velocidade do gás, as baixas vazões de líquido fazem com que a interação entre os jatos seja pequena como pode ser visto nas Figuras 4.14 e 4.17. No entanto com o aumento da vazão de líquido os jatos se aproximam e dessa forma ocorre a interação entre eles. Através da Figura 4.33 (a) verifica-se que a partir da vazão de 300 mL/min. os tamanhos das gotas tornaram-se maiores com o aumento do número de orifícios. Tal situação pode ser melhor visualizada na Figura 4.34 (a), em que os gráficos foram feitos a partir da vazão de 300 mL/min. A Figura 4.34 também mostra a aproximação do tamanho das gotas com o aumento da velocidade do gás de 59 m/s para 74 m/s. Sendo que, para a maior velocidade, os tamanhos das gotas ficaram mais próximas dos valores obtidos para a injeção através de um único orifício. Tal comportamento pode ser justificado pelo aumento da velocidade do gás estar proporcionando o maior achatamento dos jatos, como podem ser vistos nas Figuras 4.13 e 4.16. Esse maior achatamento faz com que a interação entre os jatos seja menor, fazendo com que os tamanhos das gotas formadas se aproximem dos tamanhos obtidos para a injeção através de um único orifício.

As Figuras 4.27, 4.28 e a Figura 4.33 (a) mostram uma diferença significativa no tamanho das gotas formadas para as injeções através de 2 orifícios modo 1 e modo 2. Apesar das injeções de líquido terem sido realizadas com o mesmo número de orifícios, eles encontravam-se posicionados em locais diferentes na garganta. Os tamanhos das gotas foram maiores para a configuração modo 2. Nesta configuração a distância entre os orifícios era menor (27 mm), enquanto que na injeção modo 1 a distância era maior (40 mm). A menor distância a ser percorrida fez com que os jatos se chocassem com maior intensidade mesmo para as menores vazões, fato que pode ter ocasionado o maior tamanho de gotas nesta configuração. Essa diferença sugere que o posicionamento de cada orifício na garganta do

lavador Venturi também estaria influenciando no tamanho da gota gerada dentro do equipamento.

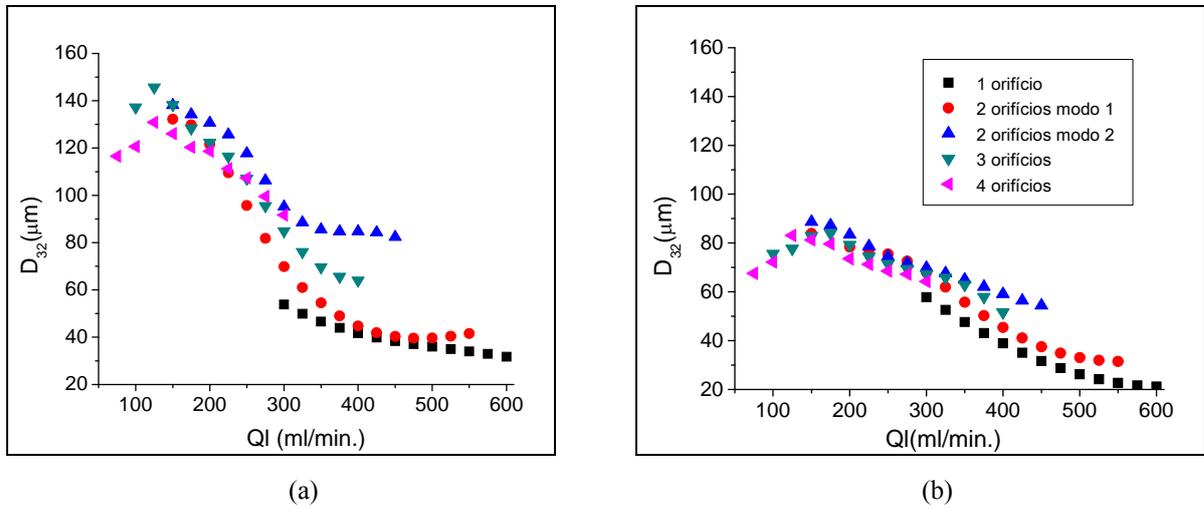


Figura 4.33 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício ($x = 240$ mm)
(a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 74$ m/s.

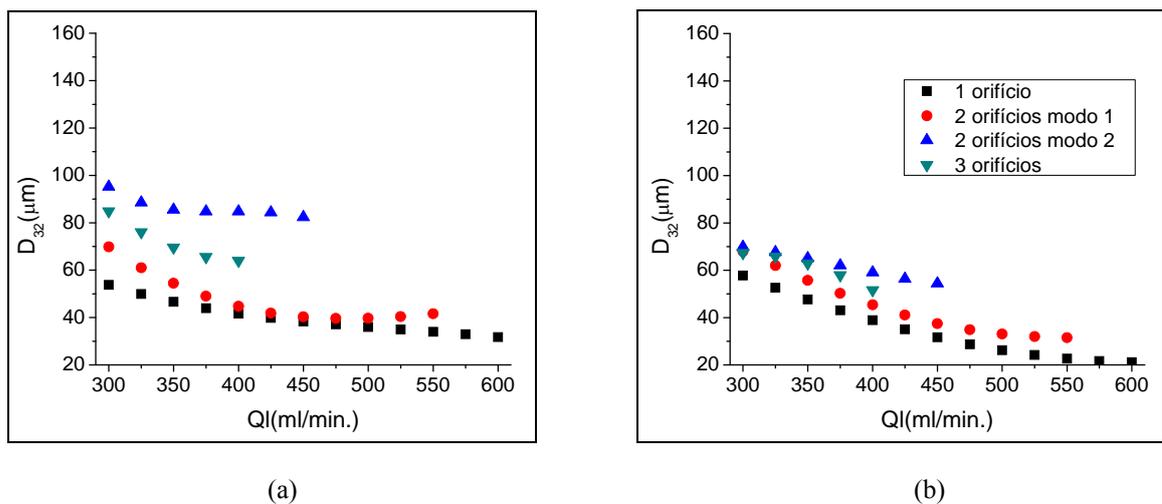


Figura 4.34 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido a partir de 300 mL/min. para cada orifício ($x = 240$ mm) (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 74$ m/s.

Além desses fatores, outros fatores podem estar interferindo no tamanho da gota para as diferentes configurações de injeção do líquido, como, por exemplo, a deposição preferencial de certos tamanhos de gotas nas paredes do lavador Venturi. Essa possibilidade será discutida mais adiante.

4.2.2.5 – Comparação dos diâmetros medidos experimentalmente com as correlações teóricas para previsão de tamanhos de gotas em lavadores Venturi

No estudo aqui realizado também se comparou o diâmetro médio de Sauter obtido experimentalmente com o diâmetro calculado pelas correlações de Boll *et al.*(1974) (equação

2.21) e Nukiyama e Tanasawa (1938) (equação 2.26), como pode ser visto nas Figuras 4.35 a 4.37. Pode-se verificar que em geral, o comportamento descrito pela correlação proposta por Boll *et al.* (1974) e Nukiyama e Tanasawa (1938) (representada nas Figuras 4.35 a 4.37 por NT) apresentaram comportamentos diferentes do obtido neste experimento, já que o aumento na vazão de líquido diminuiu significativamente o tamanho da gota formada experimentalmente, principalmente para as injeções através de 1 orifício e 2 orifícios modo 1. Já as correlações propostas prevêm um aumento suave do tamanho da gota com o aumento da vazão de líquido. É necessário destacar que no estudo realizado por Boll *et al.* (1974) foram utilizados valores de razão L/G (entre 0,6 e 2,4 L/m³) maiores que as empregadas neste trabalho (0,07 a 0,3 L/m³) e que o líquido foi introduzido através de vários atomizadores, os bocais atomizadores foram da marca Spraying Systems “Vee Jet”, n^o 3/4U80400, a utilização de bocais atomizadores sugere que o líquido entrava atomizado dentro do lavador Venturi utilizado experimentalmente. Os fenômenos observados no experimento realizado pelos autores provavelmente foram diferentes dos aqui descritos.

Já o estudo de Nukiyama e Tanasawa foi somente realizado em atomizadores pneumáticos. É necessário destacar que nestes tipos de atomizadores é característico o aumento do tamanho da gota com o aumento da vazão de líquido. Resultados semelhantes aos obtidos neste experimento foram encontrados por Costa *et al.* (2004), utilizando baixos valores da razão L/G e injeção de líquido através de um único orifício em uma corrente transversal de ar no interior de um lavador Venturi e também por Silva *et al.* (2008) também utilizando baixos valores de razão L/G e injeção de líquido através de 4 orifícios. Nestes casos, o processo de atomização é totalmente realizado pela corrente de ar em alta velocidade transversal ao jato líquido.

Através das Figuras 4.35 e 4.37 também se pode observar que com o aumento do número de orifícios de injeção de líquido e com o aumento da razão L/G os valores dos diâmetros experimentais ficaram mais próximos dos calculados pela correlação de Nukiyama e Tanasawa (1938). Sugere-se dessa forma, que tanto a correlação proposta por Boll *et al.* (1974) quanto à proposta por Nukiyama e Tanasawa, teriam uma faixa limitada de aplicação e que o número de orifícios de injeção de líquido é significativo no tamanho da gota gerada dentro do equipamento, o que não é previsto por estas correlações.

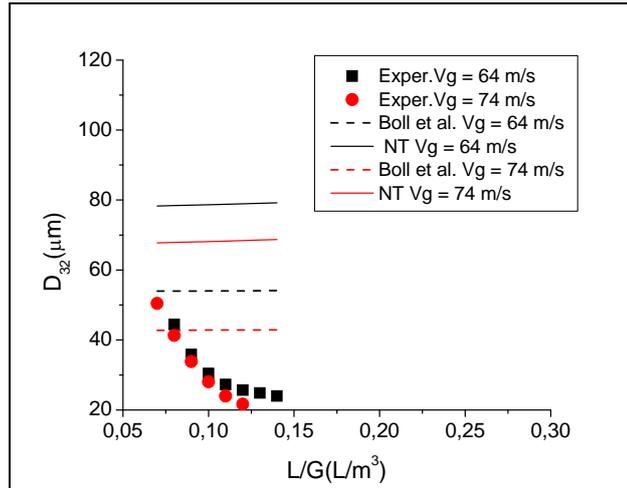


Figura 4.35 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s 1 orifício.

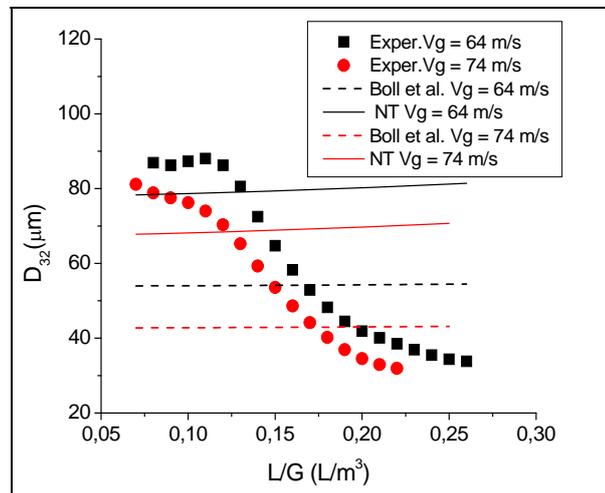


Figura 4.36 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s por 2 orifícios modo 1.

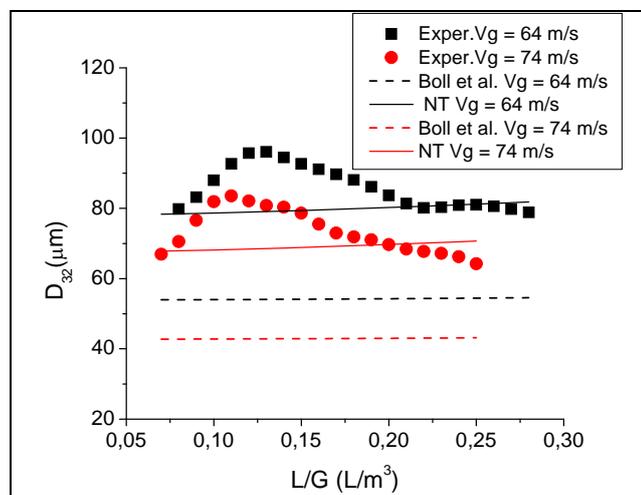


Figura 4.37 – Comparação entre os diâmetros experimentais e teóricos para $x = 240$ mm para $V_g = 64$ m/s e $V_g = 74$ m/s por 4 orifícios.

4.2.3. – Fração de Filme líquido extraído das paredes do lavador Venturi

Os resultados e discussão aqui apresentados são referentes à fração de filme que escoava como uma película aderida às paredes do lavador. Esse filme se forma porque uma parte das gotas geradas no processo de atomização atinge as paredes do lavador Venturi e acabam escoando como um filme líquido. O filme afeta o desempenho de coleta de material particulado do equipamento, já que ele não atua como coletor de partículas e também faz com que ocorra o aumento da perda de carga. A fração de líquido na forma de filme é a razão entre a vazão de líquido escoando na forma de filme aderido às paredes e a vazão total de líquido introduzida no lavador. Nos testes experimentais o líquido que escoava pelas paredes foi extraído em cada parede do equipamento separadamente. No entanto, os dados aqui apresentados mostram somente a fração de filme total extraída, isto é a soma das vazões de líquido extraída em cada parede. Mais detalhes sobre os resultados de fração de filme podem ser encontrados em estudo realizado por Daher (2008).

A Figura 4.38 apresenta a fração de filme líquido total extraído das paredes em função da razão L/G para a menor distância do ponto de injeção do líquido (100 mm) e para as diferentes velocidades de gás na garganta do lavador.

Através da Figura 4.38 pode-se verificar que a fração de líquido que se deposita nas paredes do equipamento é significativa e que o número de orifícios em funcionamento influenciou significativamente a fração de filme líquido. A injeção de líquido através de um orifício foi a responsável pela maior deposição de líquido nas paredes do lavador na maioria dos casos. Através da figura se verifica que independentemente da velocidade do gás na garganta do lavador Venturi o aumento na razão L/G proporcionou o aumento da fração filme líquido para a injeção de líquido através de um único orifício. Já para a injeção através de 4 orifícios o aumento da razão L/G fez com que a fração de líquido na forma de filme diminuísse. A razão L/G é uma medida indireta da penetração do jato na garganta no lavador Venturi. Dependendo da penetração do jato as gotas recém formadas estão mais próximas ou mais afastadas das paredes. No caso da injeção de líquido por um único orifício, o aumento na vazão de líquido ocasiona o aumento da penetração do jato, como pode ser visto nas Figuras 4.12 a 4.13. A penetração excessiva do jato na garganta do lavador faz com que as gotas recém formadas se depositem na parede oposta a da injeção. Segundo Viswanthan (1983) a penetração excessiva ocorre quando a linha central do jato ultrapassa a metade da distância entre a parede onde está localizado o orifício e a parede oposta. No caso da injeção através de 4 orifícios, a vazão é dividida pelos quatro orifícios em funcionamento assim sendo

o aumento na vazão de líquido ocasiona a melhor distribuição do líquido no centro da garganta do equipamento proporcionando a diminuição na fração do filme aderido às paredes.

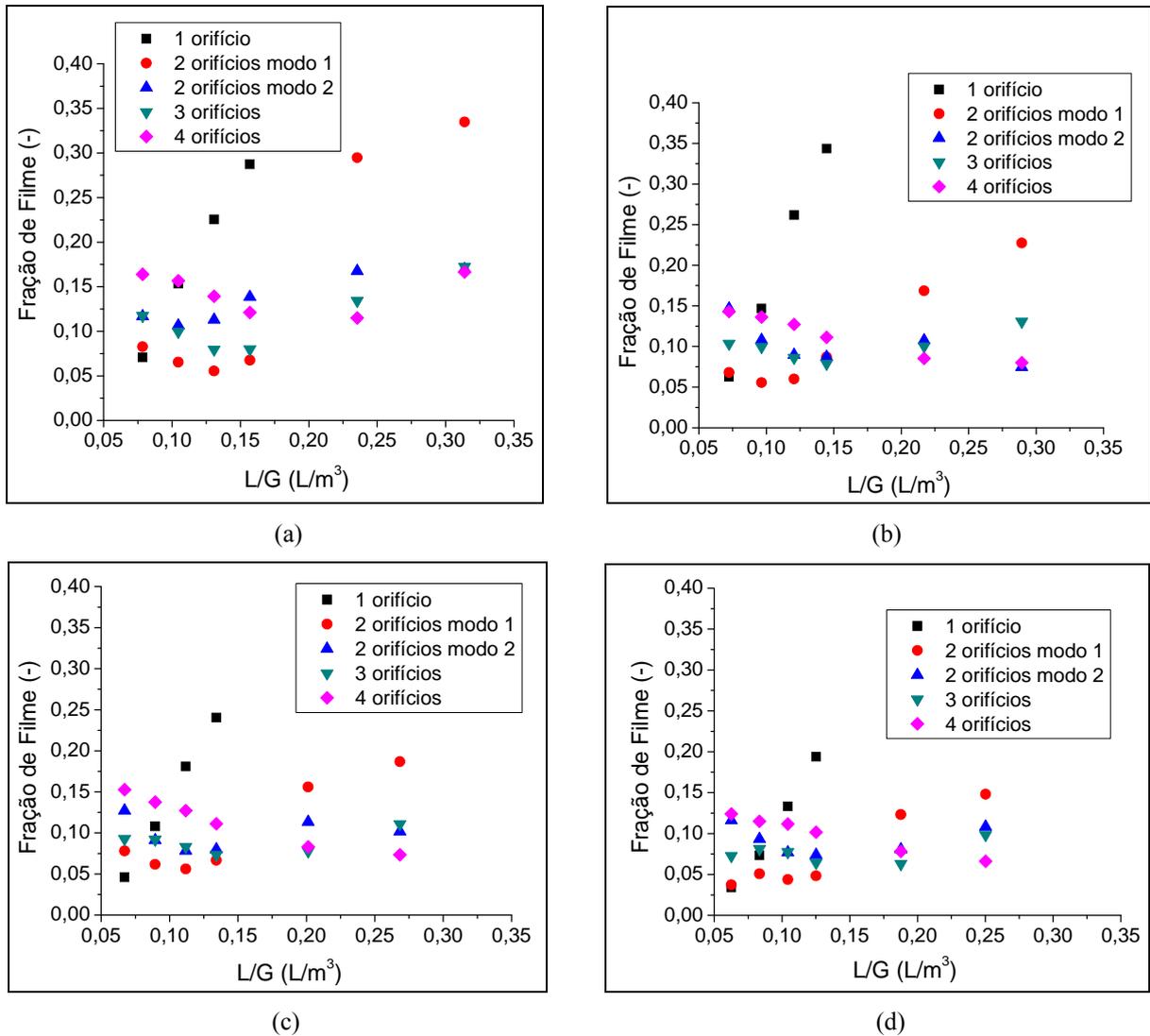


Figura 4.38 – Fração de líquido na forma de filme em função da razão L/G (a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 64$ m/s (c) $V_g = 69$ m/s (d) $V_g = 74$ m/s.

A influência da penetração do jato na fração de filme líquido pode ser visto mais detalhadamente na Figura 4.39, a qual mostra a fração de filme em função da penetração do jato adimensionalizada pelo diâmetro hidráulico da garganta do lavador. Este valor adimensional se refere à fração em que o jato penetrou na garganta do lavador Venturi. Na Figura 4.39 pode-se observar que independentemente do número de orifícios de injeção de líquido, as curvas apresentam o mesmo comportamento possuindo um ligeiro ponto de mínima formação de filme de acordo com cada configuração de injeção. Gonçalves (2000) também averiguou a influência significativa da penetração do jato na deposição de filme. Em seu estudo também foi constatado um ponto de mínima formação de filme que se localizava

próximo ao centro da garganta do lavador. Esse ponto de mínimo indica um possível ponto de otimização para a penetração do jato de modo a minimizar a fração de líquido na forma de filme.

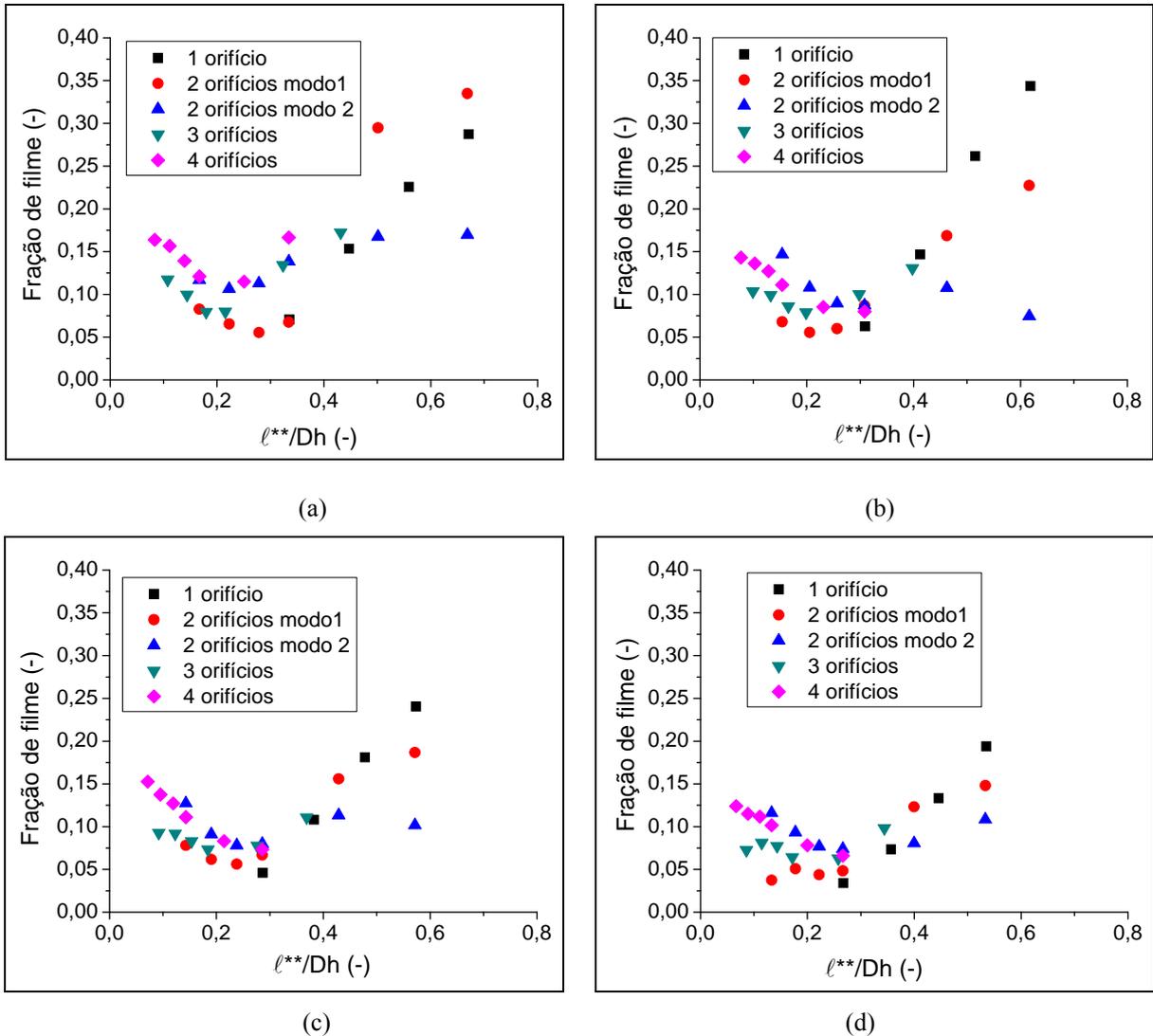


Figura 4.39 – Fração de filme em função da penetração do jato/diâmetro hidráulico ($x = 100$ mm)

(a) $V_g = 59$ m/s (b) $V_g = 64$ m/s (c) $V_g = 69$ m/s (d) $V_g = 74$ m/s.

Como pode ser visto nas Figuras 4.38 e 4.39 o aumento da velocidade do gás na garganta do lavador proporcionou a diminuição da fração de filme líquido. Apesar do aumento da velocidade do gás ocasionar o achatamento do jato líquido fazendo com que a sua penetração diminua e proporcionando uma maior proximidade com a parede em que o líquido foi injetado, conforme pode ser visto nas Figuras 4.12 e 4.13 e Figuras 4.15 e 4.16. O aumento da velocidade do gás também ocasiona a melhora do processo de atomização e conseqüente formação de pequenas gotas, as quais possuem menor inércia, fazendo com que ocorra a diminuição da fração de líquido na forma de filme. A diminuição da fração de filme

com o aumento da velocidade do gás também foi observada por Viswanathan *et al.* (1984) e por Gonçalves (2000). A Figura 4.40 ilustra a influência da velocidade do gás na fração de filme líquido para a injeção de líquido através de 2 orifícios modo 1.

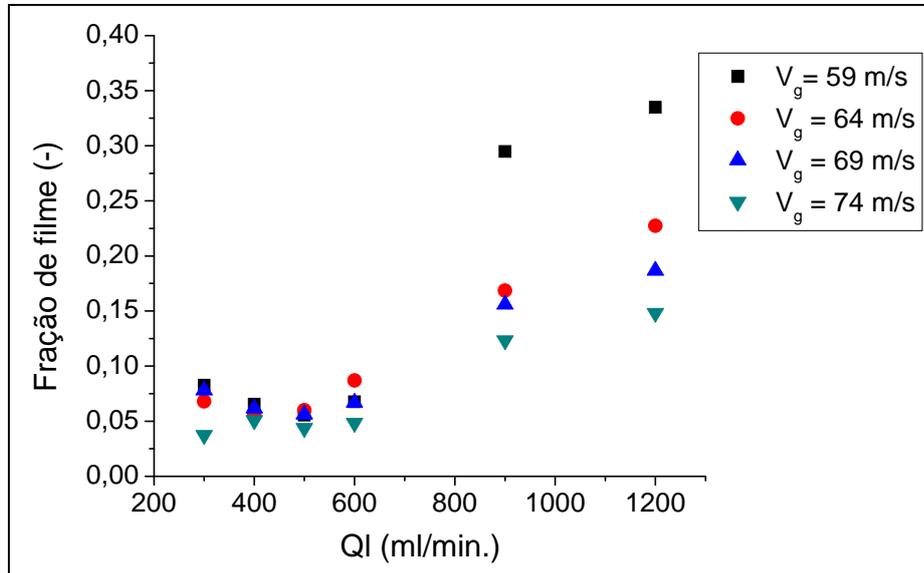


Figura 4.40 – Fração de filme em função da vazão de líquido (Ql) para todas as velocidades de gás e injeção feita através de 2 orifícios modo 1 ($x = 100$ mm).

A Figura 4.41 mostra a influência da posição axial na fração total de líquido depositada na forma de filme nas paredes do lavador Venturi. Pode-se verificar que o aumento da distância entre o ponto de injeção e o ponto de extração do filme líquido não influenciou significativamente a fração de filme depositada. As medidas foram feitas em planos distantes do ponto de injeção. Gonçalves (2000), estudando a fração de filme depositada em um lavador circular, observou que para distâncias próximas ao ponto de injeção a fração de filme era significativamente menor que as obtidas em pontos mais distantes da injeção. Os resultados de Gonçalves (2000) mostraram que em pontos mais distantes da injeção a fração de filme apresentou apenas um ligeiro aumento. Segundo o autor, apesar dos seus resultados mostrarem que a fração de filme varia com a distância axial, parece existir uma região, suficientemente longe do ponto de injeção em que a fração de filme permanece aproximadamente constante.

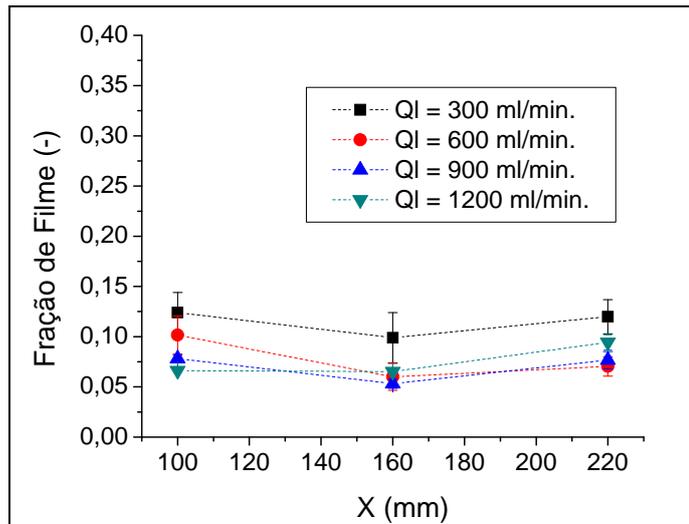


Figura 4.41 – Fração de filme líquido em função da posição axial (x) para injeção de líquido feita por 4 orifícios e velocidade do gás de 74 m/s.

Daher (2008) e Gonçalves (2000) verificando a influência da penetração do jato na fração de filme propuseram correlações empíricas para predição da fração de filme levando em conta esta influência (equações 2.37 e 2.32, respectivamente). O desempenho da correlação proposta por estes autores pode ser vista na Figura 4.42.

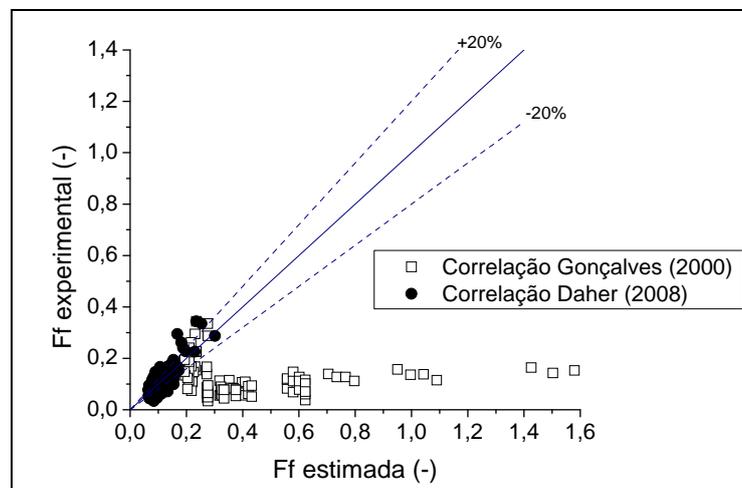


Figura 4.42 – Comparação entre os dados de fração de filme e algumas correlações propostas na literatura.

A correlação proposta por Daher (2008) foi em parte ajustada para os resultados experimentais aqui apresentados, isto justifica o seu melhor ajuste em relação à correlação proposta por Gonçalves (2000). Pode-se ver na figura que os resultados experimentais estão abaixo dos valores previstos pela correlação de Gonçalves (2000). É necessário destacar que a correlação proposta por Gonçalves (2000) foi baseada em testes experimentais feitos em um lavador circular com seção de garganta menor que a do presente estudo. Além disso, a faixa da razão L/G adotada pelo autor foi maior que a aqui estudada, tais condições favorecem a

maior formação de filme aderida as paredes do lavador. Mesmo a correlação proposta por Daher (2008), apesar de apresentar uma previsão melhor que a correlação de Gonçalves (2000), não abrange todos os resultados experimentais satisfatoriamente, já que alguns dos resultados não ficam dentro da faixa de desvio de 20%. A correlação falha principalmente para as condições de extremo, isto é, as condições em que as frações de filme foram as maiores ou as menores, estas condições são observadas principalmente para as injeções através de 1 e 4 orifícios de injeção de líquido. Segundo Gonçalves (2000) torna-se difícil propor uma única correlação experimental que possa prever em todos os casos um fenômeno tão complexo como a fração de filme líquido em um lavador Venturi.

As Figuras 4.43 e 4.44 mostram respectivamente a fração de filme e o tamanho de gota em função da penetração do jato líquido para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s e para os menores comprimentos de garganta do lavador Venturi. Segundo Gonçalves (2000), a questão da deposição e desprendimento de gotas em relação ao filme aderido as paredes, e sua influência na variação da distribuição de diâmetros ao longo do lavador Venturi, são complexas. Certamente esta troca de gotas e a penetração do jato influencia na variação de distribuição de tamanho das gotas dentro do lavador Venturi, já que a deposição preferencial de determinados tamanhos de gotas nas paredes do lavador causaria a diminuição desta fração de gotas ao longo do equipamento.

Analisando a Figuras 4.43 e a Figura 4.44 pode-se observar que para as maiores penetrações do jato foram obtidas experimentalmente as maiores frações de líquido depositado na forma de filme. Nestas condições as gotas medidas na garganta do lavador foram menores. Isso sugere que jatos com penetrações excessivas além de estarem favorecendo a melhora do processo de atomização com a geração de um número maior de pequenas gotas, podem estar ocasionando a deposição preferencial das gotas maiores nas paredes opostas à injeção do líquido, causada pela maior inércia dessas gotas e favorecida pela proximidade com a parede. O contrário ocorreria com jatos menos penetrantes. As gotas maiores tendem a manter a sua trajetória inicial, devido à inércia, já as gotas pequenas são mais facilmente carregadas pela turbulência do gás, mudando suas trajetórias iniciais facilmente. Segundo o processo de atomização descrito por Wu *et al.* (1997), as gotas maiores seriam formadas na parte superior do jato, sendo assim, no caso de penetrações baixas, como a observada na Figura 4.11, as gotas maiores poderiam fluir livremente pela corrente de ar sem se chocar com a parede oposta. A deposição preferencial depende das condições operacionais empregadas e das dimensões do equipamento.

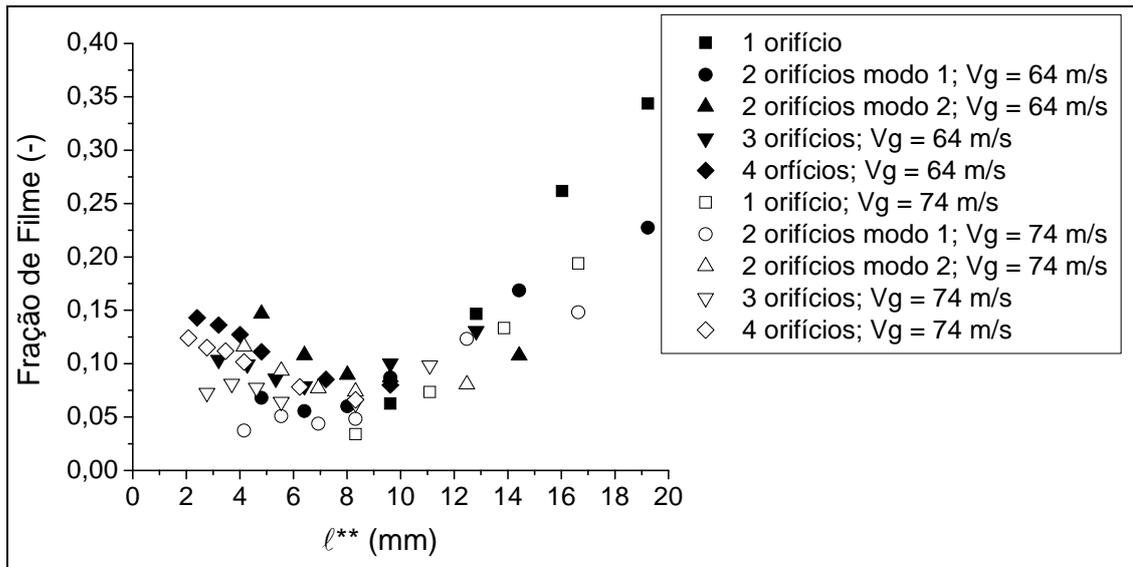


Figura 4.43 – Fração de líquido na forma de filme em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s.

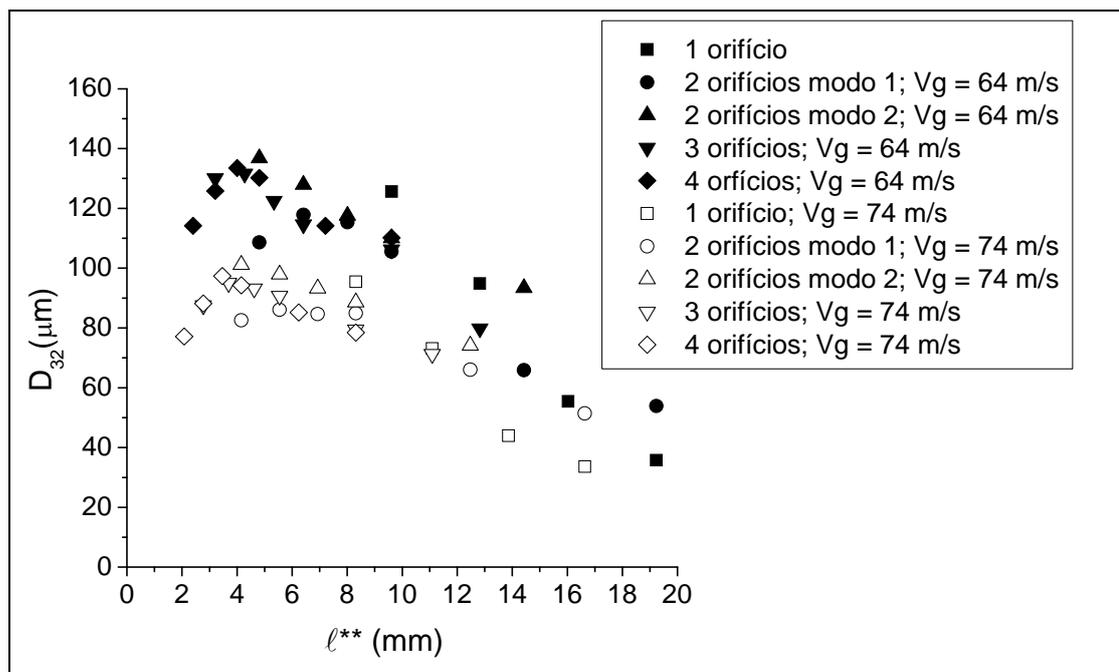


Figura 4.44 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (ℓ^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s.

4.2.4. – Estimativa de tamanho de gotas

Quantificar o tamanho de gotas geradas do processo de atomização não é uma tarefa simples, sobretudo quando elas estão confinadas dentro da garganta de um lavador. Como mencionado anteriormente, são muitos os fenômenos que podem ocorrer neste processo, como: atomização primária, atomização secundária (quando as gotas se rompem em gotas

menores), coalescência, deposição preferencial de determinados tamanhos de gotas nas paredes do equipamento, entre outros.

Devido aos complexos fenômenos que envolvem os processos de atomização, os diversos estudos realizados para determinação de tamanho de gotas utilizando atomizadores, em geral, propõem correlações empíricas para o ajuste dos diâmetros obtidos experimentalmente (Lefebvre, 1989; Liu *et al.*, 2006). Alguns desses estudos fazem uso de números adimensionais para quantificar os diâmetros de gotas (Cleary *et al.*, 2006; Krishna *et al.*, 2003, Kihm *et al.*, 1995; Park *et al.* 1996; Kihm e Chigier, 1991). Segundo Kim (2004) a análise dimensional possibilita uma estratégia para escolha dos dados relevantes e como eles devem ser apresentados. Esta é uma técnica útil em todas as áreas experimentais da engenharia. Se for possível identificar os fatores relevantes envolvidos em um processo físico, a análise dimensional pode dar forma e encontrar a relação entre eles.

As correlações clássicas utilizadas para previsão de tamanho de gotas em lavadores, as correlações desenvolvidas por Boll *et al.* (1974) e Nukiyama e Tansawa (1938), também foram obtidas empiricamente.

Com o intuito de avaliar quantitativamente a influência das variáveis operacionais deste estudo, foram avaliados alguns números adimensionais e ajustada uma correlação. Uma correlação para estimativa do diâmetro médio de Sauter pode servir como uma ferramenta de projeto que avalie a importância de certos parâmetros operacionais e como eles influenciam no tamanho da gota gerada dentro do lavador Venturi.

Primeiramente foram ajustados todos os dados de tamanho medidos experimentalmente. Para aplicar a análise dimensional ao processo de formação de gotas no lavador Venturi estudado, deve-se primeiramente estabelecer os fatores físicos relevantes. Segundo Bayvel e Orzechowsy (1993, *apud* Krishna *et al.*, 2003) os parâmetros que são importantes no processo de atomização são os seguintes: o diâmetro da gota gerada do processo de atomização (D_{32}), diâmetro do orifício (d_o), a distância axial a partir do ponto de injeção (x), as velocidades dos fluidos envolvidos (V) e as propriedades dos fluidos envolvidos no processo, no caso, a tensão superficial do líquido (σ), a densidade do líquido (ρ_l), a densidade do gás (ρ_g), a viscosidade do líquido (μ_l) e a viscosidade do gás (μ_g). Todos estes parâmetros podem ser descritos por no máximo três grandezas: M (massa), L (comprimento) e t (tempo).

No caso do estudo realizado o diâmetro médio de Sauter foi estabelecido como uma função de:

$$D_{32} = f(d_o, V_j, \mu_1, \rho_1, \sigma, 2R_{eq}, V_g, \mu_g, \rho_g, x) \quad (4.1)$$

Neste estudo para a estimativa do tamanho de gota, além dos parâmetros sugeridos por Bayvel e Orzechowsy (1993), o diâmetro médio de Sauter também foi estabelecido como em função da posição axial (x) e de $2R_{eq}$, que seria uma representação da localização dos orifícios de injeção. Assim o valor de $2R_{eq}$ varia dependendo de quais paredes os orifícios de injeção estão localizados. O valor de $2R_{eq}$ foi definido como sendo:

$$2R_{eq} = \frac{mH + nL}{m + n} \quad (4.2)$$

onde:

m = número de orifícios ativos na vertical da garganta,

n = número de orifícios ativos na horizontal da garganta,

H = altura da garganta do lavador (40 mm),

L = largura da garganta do lavador (27 mm).

A Figura 4.45 mostra o posicionamento de L e H na garganta do lavador.

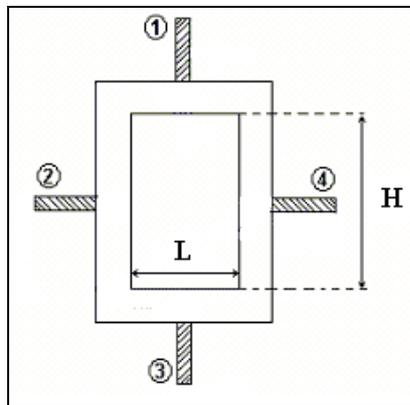


Figura 4.45 – Posicionamento de L (largura) e H (altura) na garganta do lavador.

Realizando a análise dos parâmetros importantes para determinação do tamanho de gotas para as diferentes condições experimentais estudadas chega-se aos seguintes adimensionais:

$$\frac{D_{32}}{d_o} = f\left(Re_l, We_g, Re_g, \frac{2R_{eq}}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (4.3)$$

Onde:

D_{32} = diâmetro médio de Sauter em mm

d_o = diâmetro do orifício de injeção do líquido em mm

Re_l = número de Reynolds do líquido,

Re_g = número de Reynolds do gás,

We = número de Weber,

x = posição axial a partir do ponto de injeção em mm,

D_h = diâmetro hidráulico da garganta do lavador em mm,

$2R_{eq}$ = distância equivalente ao número e posição dos orifícios calculado para as diferentes configurações de injeção de líquido.

O detalhamento do procedimento sobre o teorema de Buckingham Pi para a obtenção da correlação apresentada pode ser encontrado no Apêndice D.

Assim a equação para estimativa de tamanho de gotas para os dados experimentais fica:

$$\frac{D_{32}}{d_o} = A \cdot Re_l^B \cdot We_g^C \cdot Re_g^D \cdot \left(\frac{x}{D_h}\right)^E \cdot \left(\frac{2R_{eq}}{D_h}\right)^F \quad (4.4)$$

Para determinação das constantes A, B, C, D, E e F foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Os valores das constantes ajustadas para a equação 4.4, levando em conta todos os diâmetros de gotas medidos experimentalmente podem ser vistos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para a equação 4.4.

A	B	C	D	E	F
1,1	-0,34	-1,04	0,45	-0,37	-0,52

A Figura 4.46 mostra o desempenho da correlação proposta na equação 4.4 com os diâmetros médios de Sauter em μm .

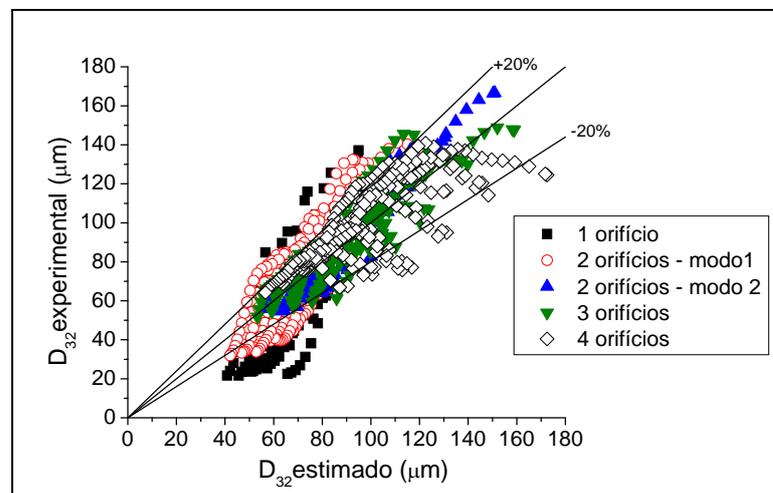


Figura 4.46 – Desempenho da correlação proposta pela equação 4.4 com os parâmetros da Tabela 4.1.

Através da Figura 4.46 pode-se verificar que os valores estimados pela correlação não foram satisfatórios, já que muitos dos valores de diâmetros ficaram fora da faixa de $\pm 20\%$. Outro indicativo de que a correlação não se ajustou adequadamente aos dados experimentais é o fato do valor de R^2 ter sido igual 0,73, sendo este um valor considerado baixo.

Como pode ser visto na Figura 4.46 as configurações de injeção que apresentaram maiores desvios foram as configurações de injeção por 1 orifício e 2 orifícios modo 1. Nestas injeções ocorriam às maiores penetrações dos jatos e também nestas condições foram medidos os menores tamanhos de gotas.

Mesmo a correlação não ajustando satisfatoriamente todos os dados experimentais pode-se avaliar algumas tendências que são encontradas com os valores das constantes ajustadas (A, B, C, D, E e F). Pode-se verificar que o diâmetro da gota é inversamente proporcional ao Re_l , o que indica que o aumento da vazão de líquido faz com que o tamanho de gota diminua. No entanto, o efeito da velocidade do gás na diminuição do tamanho de gota mostrou-se mais significativo quando comparado à influência da velocidade do jato líquido. Isto pode ser constatado pelo fato de que avaliando os expoentes do número de We_g e Re_g a velocidade do gás estaria elevada a -1,63, enquanto a velocidade do jato estaria elevada a -0,34.

O número de Weber elevado a um valor negativo é fisicamente coerente já que o diâmetro da gota diminui com a diminuição da tensão superficial do líquido. Esse comportamento esta de acordo com o observado em atomizadores pneumáticos. Na correlação encontrada por Kihm *et al.*(1995), equação 2.30, o número de Weber apresentou expoente positivo, os próprios autores sugeriram que este não era um comportamento típico e atribuíram tal situação ao fato de terem variado o diâmetro do orifício de injeção de líquido.

Através da correlação pode-se também verificar que tanto a posição axial quanto a configuração de injeção do líquido estão contribuindo de forma significativa para o tamanho da gota no lavador Venturi. Isso confirma os resultados apresentados nas Figuras 4.20 a 4.24 e Figuras 4.33 e 4.34. O valor de E igual a -0,37 indica que a gota diminui com a posição axial.

Um fator que não foi avaliado pela equação 4.4 foi à fração de filme depositada nas paredes do lavador Venturi. A princípio, o filme não foi avaliado devido ao fato da fração de filme ter sido medida somente para algumas condições experimentais em que foram realizadas as medidas de tamanhos de gotas.

Pôde-se verificar através das Figuras 4.43 e 4.44 que nas situações de maiores deposição de filme líquido (quando o líquido era injetado por 1 orifício e 2 orifícios modo 1) os tamanhos de gotas fluindo na garganta do lavador eram menores, sugerindo a existência de deposição de determinados tamanhos de gotas nas paredes do equipamento. Na tentativa de quantificar a influência que a deposição de gotas nas paredes do lavador tem no tamanho final da gota medido, foi incluído na equação 4.4 a influencia da fração de líquido obtida experimentalmente. Dessa forma, na equação 4.4 foi incluído o valor $(1-F_f)$, o qual seria a quantidade de líquido que estaria fluindo na forma de gotas na garganta do lavador.

Como a fração de filme foi medida somente para algumas condições experimentais, não abrangendo todas as condições em que os tamanhos de gotas foram medidas, e devido ao fato de as correlações para previsão da fração de filme não apresentarem resultados amplamente satisfatórios, optou-se por estimar somente os valores de diâmetros de gotas nas condições em que foram feitas a extração do filme nas paredes do equipamento. Desta forma, evita-se o acúmulo de erros que poderiam ocorrer se fossem utilizadas as correlações para previsão de fração de filme além das condições medidas experimentalmente. Tal procedimento poderia superestimar ou subestimar a influências de um dos adimensionais analisados neste estudo.

Assim sendo, a equação para estimativa do tamanho de gota levando em conta a influência da deposição de gotas nas paredes do lavador fica da seguinte forma:

$$\frac{D_{32}}{d_o} = A \cdot \text{Re}_l^B \cdot \text{We}_g^C \cdot \text{Re}_g^D \cdot \left(\frac{x}{D_h}\right)^E \cdot \left(\frac{2R_{eq}}{D_h}\right)^F \cdot (1 - F_f)^G \quad (4.5)$$

Os parâmetros ajustados na equação 4.5 podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros ajustados para a equação 4.5.

A	B	C	D	E	F	G
1,1	-0,20	-1,37	0,51	-0,37	-0,52	2,68

A Figura 4.47 compara a previsão de tamanho de gotas da equação 4.4, somente para as condições experimentais em que foram feitas as extrações do filme líquido (Figura 4.47 a), e a previsão de tamanho dada pela equação 4.5, em que foi adicionada a influencia do filme líquido (Figura 4.47 b).

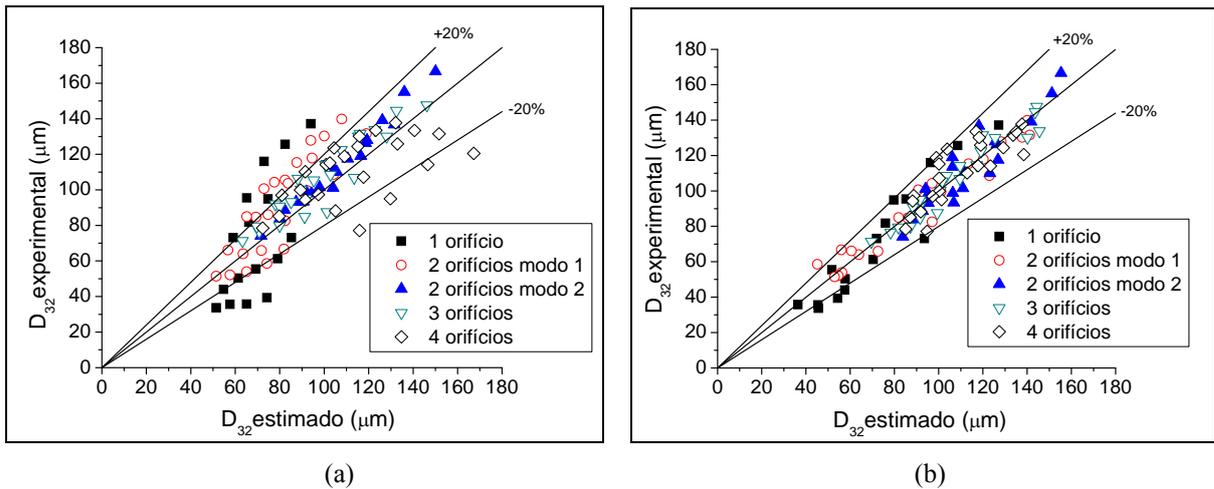


Figura 4.47 – Desempenho das correlações propostas (a) equação 4.4 com os parâmetros da Tabela 4.1, somente para as condições experimentais em que foram efetuadas a extração do filme das paredes do lavador Venturi.

(b) equação 4.5 com os parâmetros da Tabela 4.2.

Através da Figura 4.47 pode-se verificar que os dados foram melhor ajustados pela equação 4.5. O valor de R^2 foi de 0,91, este valor para estimativa do ajuste pode parecer pequeno. No entanto, segundo Kim (2004), valores na faixa de 0,9 podem ser considerados bons, já que o processo de atomização que ocorre quando se injeta um líquido transversal a uma corrente de ar é bastante complexo e aleatório sendo de difícil previsão. Pode-se verificar que os valores de tamanho de gotas estimados pela correlação mostrada na equação 4.5 ajustaram os dados dentro da faixa dos $\pm 20\%$.

Através dos valores das constantes de A a G pode-se verificar que a fração de filme depositada exerce influência significativa no tamanho da gota medida dentro do lavador. O valor de $(1-F_f)$ elevado à maior potência e também a melhora no ajuste quando se compara a Figura 4.47 (a) com a Figura 4.47 (b) significam que a deposição de determinados tamanhos de gotas é de importância significativa no tamanho da gota medida. Estas gotas, que fluem juntamente com a corrente de ar, são as principais responsáveis pela coleta dos possíveis contaminantes presentes neste ar.

Através da equação 4.5 também se pode verificar que as constantes referentes à influência da posição axial e da configuração de injeção de líquido foram iguais às ajustadas na equação 4.4. Isso sugere que mesmo com a diminuição dos dados ajustados para previsão de tamanho de gotas devido à inclusão do efeito da deposição do filme, o comportamento em relação à posição axial de medida da gota e o posicionamento do orifício na garganta foram os mesmos. A influência da velocidade do jato na diminuição do tamanho da gota diminuiu e o efeito da velocidade do gás foi aumentado. Tal comportamento pode ser visto no valor do

expoente referente à velocidade do jato, o qual passou de -0,34 na equação 4.4 para -0,20 na equação 4.5. Já a influência da velocidade do gás aumentou passando de -1,63 a -2,23. Essas variações podem ser em decorrência da inclusão do efeito da deposição do filme líquido nas paredes do equipamento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

- Confirmou-se que a atomização não ocorre em um único ponto do jato, ocorrendo um desprendimento contínuo de massa ao longo do mesmo.
- Maiores velocidades do gás ocasionaram um maior achatamento do jato devido à maior intensidade da força de arraste.
- O aumento da vazão de líquido gerou jatos mais penetrantes que acabaram se chocando, ocasionando dessa forma a maior interação entre eles e a maior dispersão do líquido no centro da garganta do lavador.
- As medidas de tamanho de gotas na posição axial de 120 mm apresentaram os maiores diâmetros de Sauter.
- As medidas de tamanho de gotas nas distâncias axiais de 180 mm e 240 mm ficaram mais próximas mostrando que o processo de atomização apresentava-se mais estável para estas distâncias axiais.
- O fenômeno da coalescência não mostrou influência significativa nos tamanhos das gotas para medidas axiais até 240 mm.
- A vazão total de líquido injetada no equipamento influenciou significativamente o tamanho da gota gerada no processo de atomização.
- Maiores vazões de líquido sendo injetadas no equipamento, mantendo-se o mesmo número de orifícios de injeção de líquido, apresentaram maiores velocidades de jatos e conseqüentemente jatos mais penetrantes.
- Jatos mais penetrantes ocasionaram a maior interação entre o jato e a corrente de ar em alta velocidade favorecendo a formação de gotas menores, independentemente da configuração de injeção adotada.
- O número de orifícios de injeção de líquido mostrou-se um fator relevante no tamanho da gota.
- Os tamanhos das gotas aumentaram com o aumento do número de orifícios em funcionamento, mantendo-se a vazão total de líquido constante.

- O aumento do tamanho da gota com o aumento do número de orifícios em funcionamento pode ser justificado pela interação entre os jatos e as baixas penetrações dos jatos, as quais ocorrem quando a vazão do líquido é dividida por um maior número de orifícios em funcionamento.
- Jatos com penetrações excessivas apresentaram os menores tamanhos de gotas.
- A localização (posicionamento) de cada orifício na garganta do lavador Venturi influenciou o tamanho da gota, já que os tamanhos de gotas para as injeções através de 2 orifícios modo 1 e modo 2 apresentaram diferentes tamanhos de gotas apesar do líquido ter sido injetado pelo mesmo número de orifícios. Na configuração de injeção por 2 orifícios modo 1 os orifícios estavam separados por 40 mm enquanto que no modo 2 estavam separados entre si por 27 mm.
- As correlações propostas para tamanhos de gotas dentro de lavadores Venturi não se mostraram satisfatórias quando comparadas aos resultados experimentais, sugerindo que estas correlações teriam uma faixa limitada de aplicação,
- As correlações também não levam em conta o número de orifícios de injeção de líquido, o qual mostrou influência significativa no tamanho da gota gerada dentro do equipamento.
- A fração de filme líquido variou significativamente com a velocidade do gás, vazão de líquido e configuração de injeção do líquido.
- A fração de filme variou com a penetração do jato líquido e mostrou um ponto de mínima deposição de filme nas paredes do lavador para todas as configurações.
- Nas condições experimentais em que ocorrem as maiores frações de filme ocorreram os menores tamanhos de gotas sugerindo a deposição preferencial de certos tamanhos de gotas nas paredes do equipamento.
- As penetrações excessivas dos jatos proporcionam tanto o favorecimento do mecanismo de ruptura de superfície, que favorece a formação de pequenas gotas, quanto à deposição das gotas maiores nas paredes opostas as da injeção, já que segundo o mecanismo de ruptura de jato de Wu *et al.* (1997) as gotas maiores estariam localizadas na parte superior do jato.
- A correlação apresentada na equação 4.4 não foi completamente satisfatória no ajuste aos dados experimentais, entretanto ela constatou que o aumento da velocidade do jato contribuiu com a geração de gotas menores e que a posição axial e a posição de localização dos orifícios influenciam significativamente os tamanhos das gotas.

- A correlação apresentada na equação 4.5 comprova que a deposição de certos tamanhos de gotas possui influência significativa no tamanho da gota medida no interior do lavador Venturi. Fato que foi constatado com adição do termo referente à fração de filme na equação 4.4.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar outras configurações de injeção de líquido e aumentar o número de orifícios de injeção.
- Realizar testes para razões L/G maiores, dentro da faixa típica de operação de lavadores Venturi.
- Variar o diâmetro do orifício de injeção de líquido para verificar a sua influência no tamanho da gota gerada dentro do lavador.
- Realizar testes para determinação da fração de filme para as demais condições experimentais em que foram realizados os teste de tamanhos de gotas.
- Realizar medidas da dispersão do líquido no interior da garganta do lavador para as diferentes configurações de injeção do líquido.
- Realizar testes de eficiência de coleta de partículas nas condições experimentais adotadas para medição dos tamanhos de gotas com a finalidade de avaliar a influência do tamanho e distribuição das gotas na eficiência de coleta.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELBERG, M. Break-up rate and penetration of a liquid jet in a gas stream. *AIAA Journal*, v.5, p.1408-1415, 1967.
- ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Estimating maximum removal efficiency in Venturi scrubbers. *AIChE Journal*, v.44, n.11, p.2549ff, 1998.
- ANANTHANARAYANAN, N. V.; VISWANATHAN, S. Predicting the liquid flux distribution and collection efficiency in cylindrical Venturi scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.38, p.223-232, 1999.
- ATAY, I.; LEWANDOWSKI, G.; TRATTNER, R. Fluid flow and gas absorption in na ejector Venturi scrubber. *Environmental Progress*, v.6, n.3, p. 198-203, 1987.
- ATKINSON, D.S.F.; STRAUSS, W. Droplet size and surface tension in Venturi scrubbers. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.28, n.11, p.1114-1118, 1978.
- AZZOPARDI, B.J. Measurement of drop sizes. *Journal of Heat and Mass Transfer*, v.22, p.1245-1279, 1979.
- AZZOPARDI, B.J.; GOVAN, A.H. The modeling of Venturi scrubbers. *Filtration and Separation*, v.21, p.196-200, May/June 1984.
- AZZOPARDI, B.J. Liquid distribution in Venturi scrubbers: the importance of liquid films on the channel walls. *Chemical Engineering Science*, v.48, n.15, p.2807-2813, 1993.
- AZZOPARDI, B.J.; HEWITTI, G.F. Maximum drop sizes in gas-liquid flows. *Multiphase Science and Technology*, v.9, n.2, p.109-204, 1997.
- BAYVEL,L.P. The effect of polydispersity of drops on the efficiency of a Venturi scrubber. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v.60, p.31-34, 1982.
- BOLL, R.H.; FLAIS, L.R.; MAURER, P.W.; THOMPSON, W.L. “Mean drop size in a full scale Venturi scrubber via tranmissometer”. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v.24, p.934-938, 1974.
- CALVERT,S. How to choose a particulate scrubber. *Chemical Engineering*, p.54-68, 29 August 1977.

- CLEARY, V.; BOWEN, P.; WITLOX, H. Flashing liquid jets and two-phase droplet dispersion I. Experiments for derivation of droplet atomization correlations. *Journal of Hazardous Materials*, v.142, n. 3, p.786-796. 2007.
- COSTA, M. A.M.; HENRIQUE, P.R.; GONÇALVES, J.A.S.; COURY, J.R. “Droplet size in a rectangular Venturi scrubber”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.21, n.2, p.335-343, 2004.
- COSTA, M.A.M. Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – Brasil, 2002.
- COSTA, M.; MELO, M.J.; SOUSA, M.M.; LEVY, Y. Spray characteristics of angled liquid injection into subsonic crossflows. *AIAA Journal*, v. 44, nº 3, p. 646-653, 2006.
- DAHER, M.A.F. Fração de filme líquido nas paredes de um lavador Venturi. PPG-EQ/UFSCar – São Carlos, 2008
- FATHIKALAJAHI, J.; TALAIE, M.R.;TAHERI, M. Theoretical study of liquid droplet dispersion in a Venturi scrubber. *Journal of Air & Waste Management Association*, v.45, p.181-185, 1995
- FATHIKALAJAHI, J.; TALAIE, M.R.; TAHERI, M. Theoretical study of nonuniform droplet concentration distribution on Venturi scrubber performance. *Particulate Science and Technology*, v.14, p.153-164, 1996.
- FERNÁNDEZ ALONSO, D.; GONÇALVES, J.A.S.; AZZOPARDI, B.J.; COURY, J.R. Drop size measurements in Venturi scrubbers. *Chemical Engineering*, v.56, p.4901-4911, 2001.
- FULLER, R.P.; WU, P-K; KIRKENDALL, K.A.; NEJAD, A.S. Effects of injection angle on atomization of liquid jets in transverse airflow. *AIAA Journal*, v.38, nº 1, p 64-72, 2000.
- GONÇALVES, J.A.S.; COSTA, M.A.M.; HENRIQUE, P.R.; COURY, J.R. Atomization of liquids in a Pease Antony Venturi scrubber – Part I. Jet dynamics. *Journal Hazardous Materials*, B97, p.267-279, 2003.
- GONÇALVES, J.A.S.; COSTA, M.A.M.; HENRIQUE, P.R.; COURY, J.R. Atomization of liquids in a Pease Antony Venturi scrubber – Part II. Droplet dispersion. *Journal Hazardous Materials*, p.147-157, 2004.
- GONÇALVES, J.A.S. Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - Brasil, 2000.
- GONÇALVES, J.A.S.; COSTA, M.A.M.; FALAGUASTA, M.C.R.; COURY, J.R. Film Fraction in Peasy-Anthony Venturi Scrubbers. In: International Congress of Chemical

- and Process Engineering, XVI, 2004, Praga. Proceedings of the CHISA 2004 (CD-Rom), 2004.
- HAY, K.J.; ZI-CHAO LIU; HANRATTY, T.J. Relation of deposition to drop size when the rate is nonlinear. *International Journal of Multiphase Flow*, v.22,n.5, p.829-848, 1996.
- JOHNSTONE, H.F.; FEILD, R.B.; TASSLER, M.C. Gas absorption and aerosol collection in Venturi scrubbers. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.45, p.1601-1608, 1954.
- KIHM, K.D.; LYN, G.M.; SON, S.Y. Atomization o cross-injecting sprays into convective air stream. *Atomization and Sprays*, v. 5, pp. 417-433, 1995.
- KIHM, K.D.& CHIGIER, N. Effect of shock waves on liquid atomization of a two-dimensional airblast atomizer. *Atomization and Sprays*, v. 1, p. 113-136, 1991.
- KIM, K.L.; MARSHAL,J.R. Drop size distributions from pneumatic atomizers. *AIChE Journal*, v.17, n.3, p.575-584, 1971.
- KIM, T.K. Study of formation and convective transport of aerosols using optical diagnostic technique. Tese de doutorado, Texas A&M University, Estados Unidos, 2004.
- KRISHNA, K.; KIM, T.K.; KIHM, K.D.; ROGERS, W.J.; MANNAN, M.S. Predictive correlations for leaking heat transfer fluid aerosols in air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 16, p.1-8, 2003.
- KUSH, E.A. & SCHETZ, J.A. Liquid jet injection into a supersonic flow. *AIAA Journal*, v.11, n.9, p.1223-1224, 1973.
- LEFEBVRE, A.H. *Atomization and Sprays*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1989.
- LEITH, D.; MARTIN, K.P; COOPER, D.W. Liquid utilisation in a Venturi scrubber. *Filtration and Separation*, p.191-195, May/June 1985.
- LIU, H.F.; LI, W.F.; GONG, X.; CAO, X.K.; XU, J.L.; CHEN, X.L.; WANG, Y.F.; YU, G.S.; WANG, F.C.; YU, Z.H. Effect of liquid jet diameter on performance of coaxial two-fluid airblast atomizers. *Chemical Engineering and Processing*, v. 45, p.240-245, 2006.
- LORA, E.E.S. *Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte*. 2.ed. – Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2002.
- MALVERN INSTRUMENTS Ltd, *Spraytec Manual*, United Kingdom, 1999.

- MUIR, D.M.; KUYE, A.O. Effect of drop size, polydispersity and degree of liquid entrainment on Venturi scrubber performance. World Filtration Congress, 4th, Ostend, Belgium, April 22-25, 1986.
- NUKIYAMA, S.; TANASAWA, Y. 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, 1938
- PARK, B.K.; LEE, J.S. & KIHM, K.D. Comparative study of twin-fluid atomization using sonic or supersonic gas jets. *Atomization and Sprays*, v.6, p.285-304.
- PARKER, G.J.; CHEONG, K.C. Air-water tests on a Venturi for entraining liquid Films. *International Journal of Mechanical Science*, v.15, p.633-641, 1973.
- PLACEK, T.D.; PETERS, L.K. Analysis of particulate removal in Venturi scrubbers - Effect of operating variables on performance. *AIChE Journal*, v.27, n.6, p.984-993, 1981.
- ROBERTS, D.B.; HILL, J.C. Atomization in a Venturi Scrubber. *Chemical Engineering Communication*, v.12, p.33-68, 1981.
- SILVA, A.M., TEIXEIRA, J.C.F., TEIXEIRA, S.F.C.F. Experiments in large scale venture scrubber. Part II. Droplet size. Chemical Engineering and Processing. Artigo em impressão. DOI: 10.1016/j.cep.2008.05.007. 2008.
- SWITENBANK, J.; BEER, J.M.; TAYLOR, D.S.; ABBOT, D.; MACCREATH, G.C. A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution- Experimental diagnostics in gas phase combustion systems. Progress in Astronaut and Aeronauts, v.53, p.421-447, 1976.
- TAHERI, M.; SHEIH, C.M. Mathematical modeling of atomizing scrubbers. *AIChE Journal*, v.21, p.153-157, 1975.
- TALAIE, M.R.; FATHIKALAJAHI, J.; TAHERI, M. Mathematical modeling of SO₂ absorption in a Venturi Scrubber. *Journal of the Air and Waste Management Association*, v.47, p. 1211-1215, 1997.
- TAWLEY, S.M. Spatio-temporal Characteristics of a Spray from a Liquid Jet in Crossflow, Tese de mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Estados Unidos, 2006.
- TAYLOR, E.H.; HARMON, D.B. Measuring Drop Size in Sprays. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.46, p.1455-1457, 1954.

- TEIXEIRA, J.C.F., AZZOPARDI, B.J.; BOTT, T.R. The effect of inserts on drop sizes in Venturi annular flow. In: Proceedings of the 2nd UK National Heat Transfer Conference, September 14-16, v.II, p.121, 1988.
- TRIBALLIER, K.; DUMOUCHEL, C.; COUSIN, J. A technical study on the Spraytec performances: influence of multiple light scattering and multi-modal drop-size distribution measurements. *Experiments in Fluids*, v.35, p.347-356, 2003.
- VISWANATHAN, S.; LIM, D.S.; RAY, M.B. Measurement of drop size and distribution in an annular two-phase, two-component flow occurring in a Venturi scrubber. *Ind. Eng.Chem.Res.*, v.44, p.7458-7468, 2005.
- VISWANATHAN, S. & SHYAN, L.D. Effect of polydispersity of droplets in the prediction of flux distribution in a Venturi Scrubber. *Environmental Science & Technology*, v.34, n.23, 2000.
- VISWANATHAN, S. Examination of liquid film characteristics in the prediction of pressure drop in a Venturi scrubber. *Chemical Engineering Science*, v.53, n.17, p.3161-3175, 1998.
- VISWANATHAN, S. Modeling of Venturi scrubber performance. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v.36, n.10, p.4308-4317, 1997.
- VISWANATHAN, S.; GNYP, A.W.; ST. PIERRE, C.C. Examination of gas flow in a Venturi scrubber. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v.23, p.303-308, 1984.
- VISWANATHAN, S.; ST. PIERRE, C.C.; GNYP, A.W. Jet penetration measurements in a Venturi scrubber. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.61, p.504-508, 1983.
- WU, P-K; KIRKENDALL, K.A.; FULLER, R.; NEJAD, A.S. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows. *Journal of Propulsion and Power*, v. 13, n° 1, p 64-73, 1997
- WU, P-K; KIRKENDALL, K.A.; FULLER, R.P.; NEJAD, A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows. *Journal of Propulsion and Power*, v. 14, n° 2, p 173-182, 1998.
- ZAIDI, S.H; ALTUNBAS, A.& AZZOPARDI, B.J. A comparative study of phase Doppler and laser diffraction techniques to investigate drop sizes in annular two-phase flow. *Chemical Engineering Journal*, v.71, p.135-143, 1998.

APÊNDICE A

Resultados experimentais dos testes preliminares

Tabela A1 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 120$ mm

X (mm)	Vg (m/s)	L/G (L/m ³)	D32 exp. (µm)				D32 calc. (µm)	
			1 orifício	3 orif. Modo 1	3 orif. Modo 2	5 orifícios	Boll <i>et al.</i>	N-T
120	59	0,10	152,65	-	-	-	62,06	85,71
120	59	0,20	117,39	136,08	111,58	119,02	62,35	87,32
120	59	0,30	56,02	134,34	113,1	123,87	62,81	89,41
120	64	0,09	136,77	-	-	-	54,00	78,56
120	64	0,19	99,13	107,42	96,37	81,53	54,22	79,98
120	64	0,28	54,32	104,31	91,5	84,91	54,56	81,81
120	69	0,09	112,82	-	-	-	47,50	72,50
120	69	0,17	86,14	87,36	81,51	75,73	47,66	73,75
120	69	0,26	56,53	93,3	80,31	72,38	47,92	75,38

Tabela A2 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 180$ mm.

X (mm)	Vg (m/s)	L/G (L/m ³)	D32 exp. (µm)				D32 calc. (µm)	
			1 orifício	3 orif. Modo 1	3 orif. Modo 2	5 orifícios	Boll <i>et al.</i>	N-T
180	59	0,10	141,01	-	-	-	62,06	85,71
180	59	0,20	102,28	130,27	124,38	111,02	62,35	87,32
180	59	0,30	48,67	137,13	120,36	109,39	62,81	89,41
180	64	0,09	133,34	-	-	-	54,00	78,56
180	64	0,19	96,55	115,52	105,86	98,94	54,22	79,98
180	64	0,28	45,26	115,14	100,99	89,28	54,56	81,81
180	69	0,09	102,97	-	-	-	47,50	72,50
180	69	0,17	90,76	90,25	84,03	74,39	47,66	73,75
180	69	0,26	50,11	94,46	82,46	77,86	47,92	75,38

Tabela A3 - Diâmetro de Sauter médio para as diferentes condições operacionais adotadas com $x = 240$ mm.

X (mm)	Vg (m/s)	L/G (L/m ³)	D32 exp. (µm)				D32 calc. (µm)	
			1 orifício	3 orif. Modo 1	3 orif. Modo 2	5 orifícios	Boll <i>et al.</i>	N-T
240	59	0,10	123,8	-	-	-	62,06	85,71
240	59	0,20	81,81	104,83	97,64	83,58	62,35	87,32
240	59	0,30	44,95	124,62	99,18	95,96	62,81	89,41
240	64	0,09	111,41	-	-	-	54,00	78,56
240	64	0,19	80,83	88,84	82,36	70,9	54,22	79,98
240	64	0,28	44,92	97,22	84,13	61,46	54,56	81,81
240	69	0,09	84,22	-	-	-	47,50	72,50
240	69	0,17	75,5	73,35	83,58	64,86	47,66	73,75
240	69	0,26	44,64	79,89	69,3	65,8	47,92	75,38

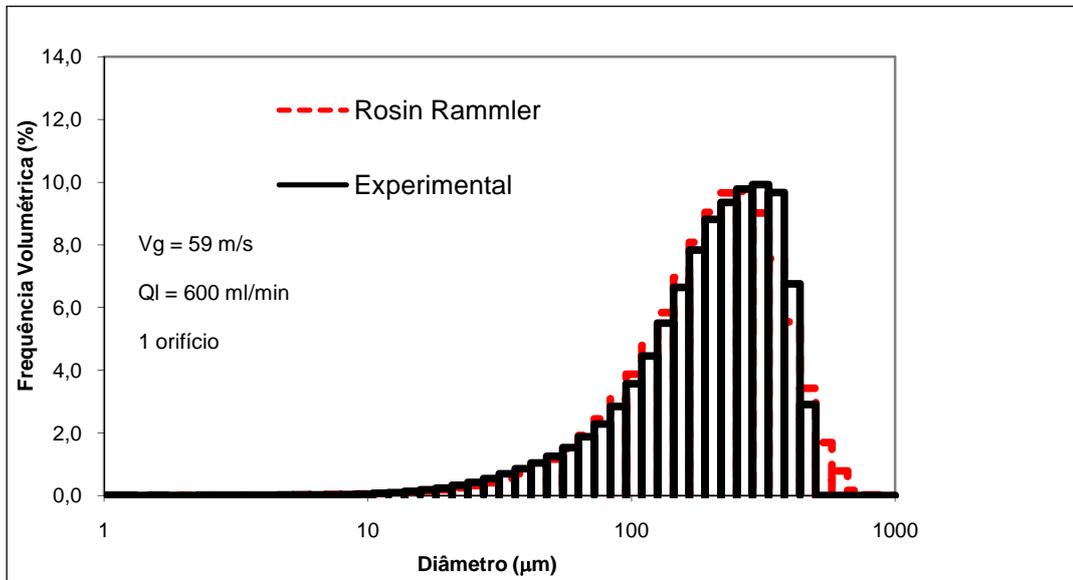
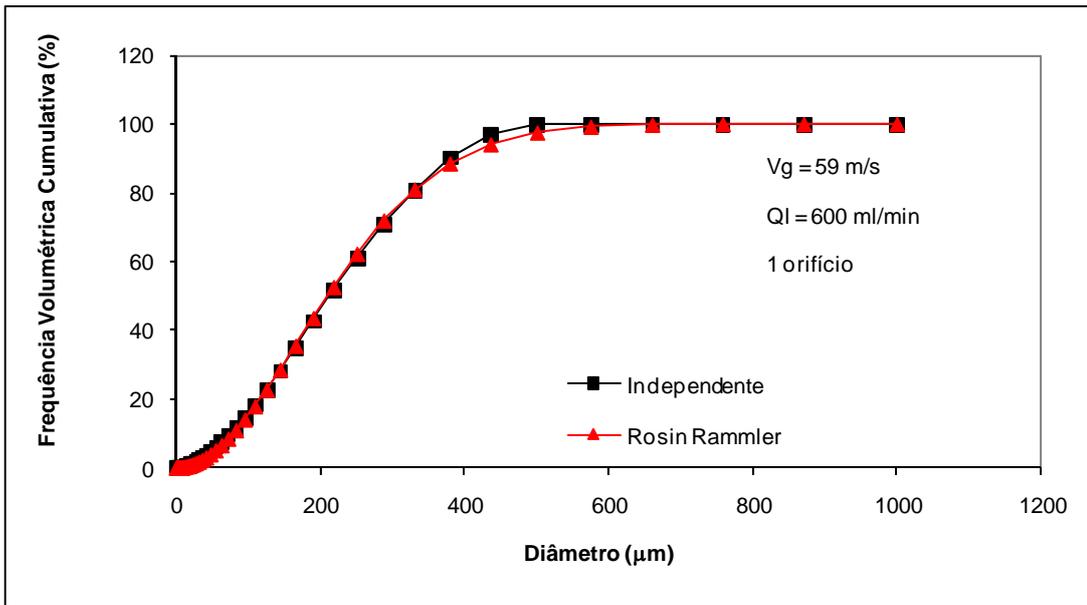


Figura A1 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min}$, 1 orifício e $x = 120 \text{ mm}$.

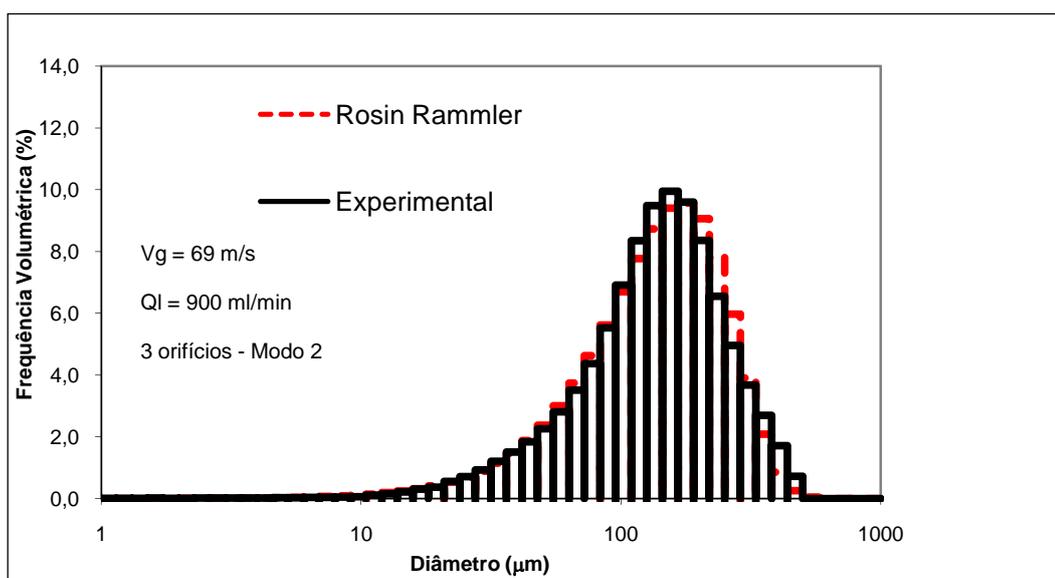
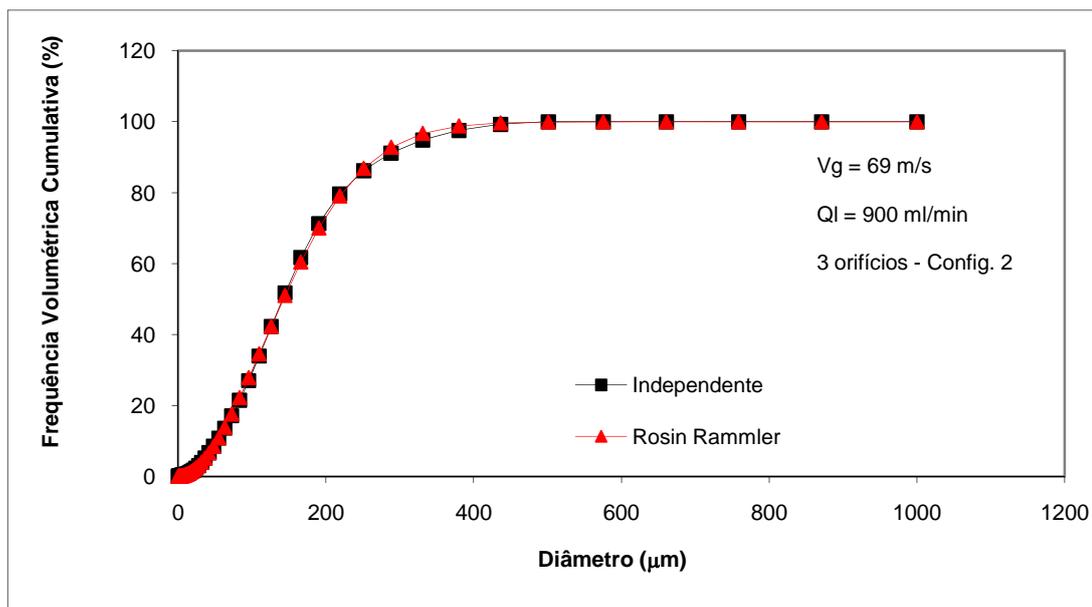


Figura A2 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69 \text{ m/s}$, $Q_l = 900 \text{ mL/min}$, 3 orifícios – Modo 2 e $x = 120 \text{ mm}$.

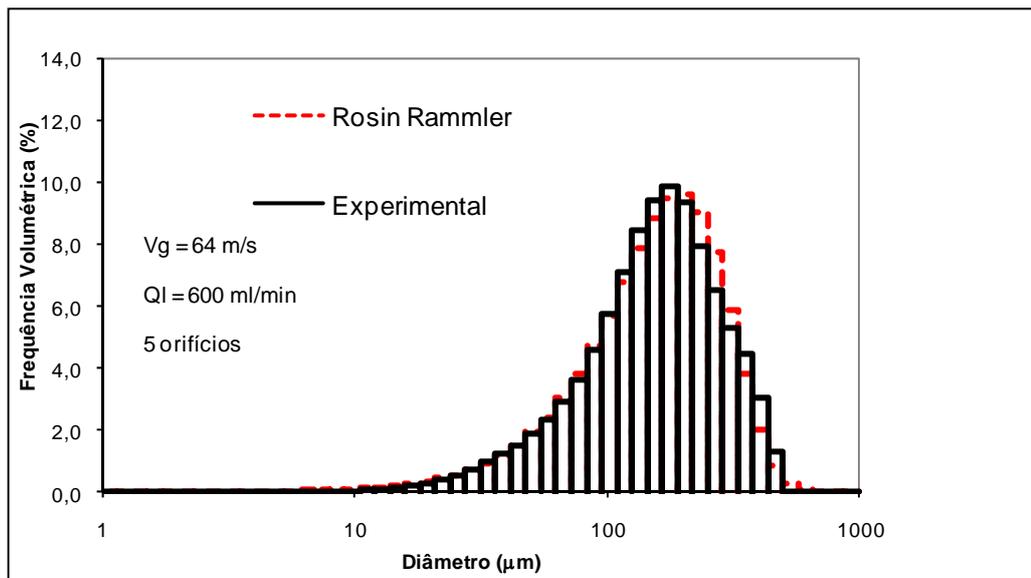
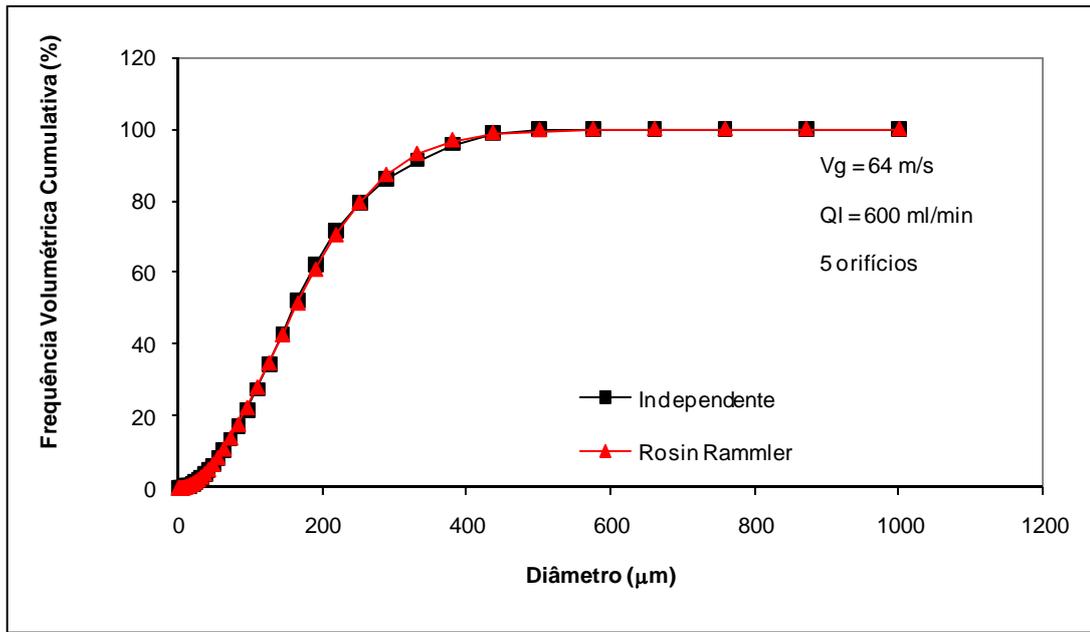


Figura A3 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 64 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min}$, 5 orifícios e $x = 120 \text{ mm}$.

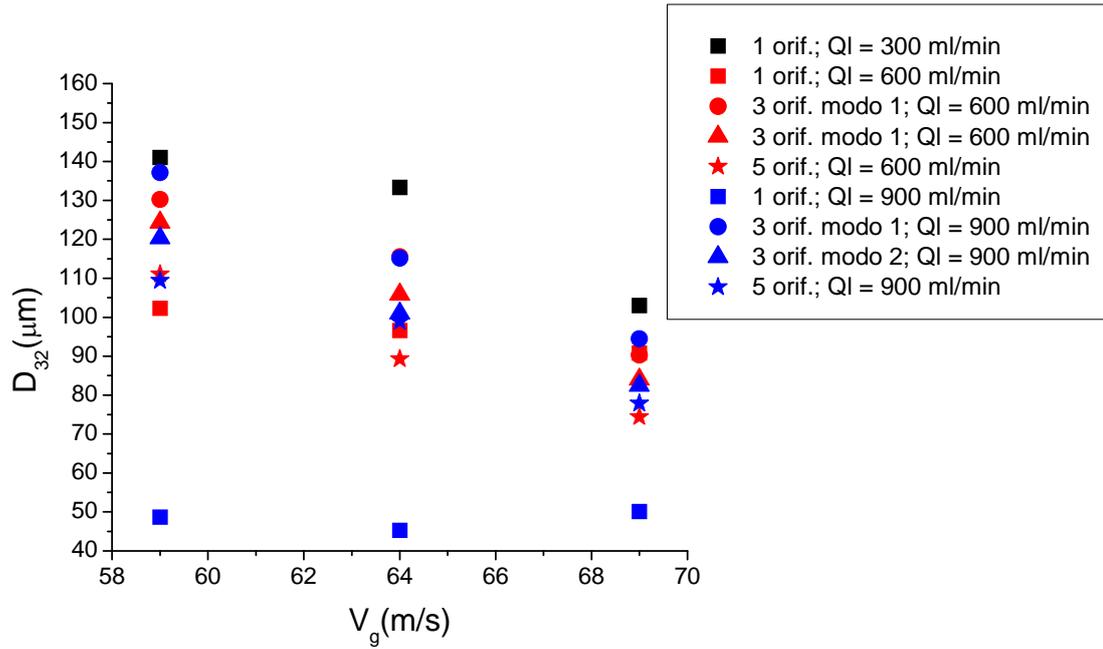


Figura A4 – Variação do D_{32} experimental em função da velocidade para as diferentes vazões e números de injeção de líquido, para $x = 180 \text{ mm}$.

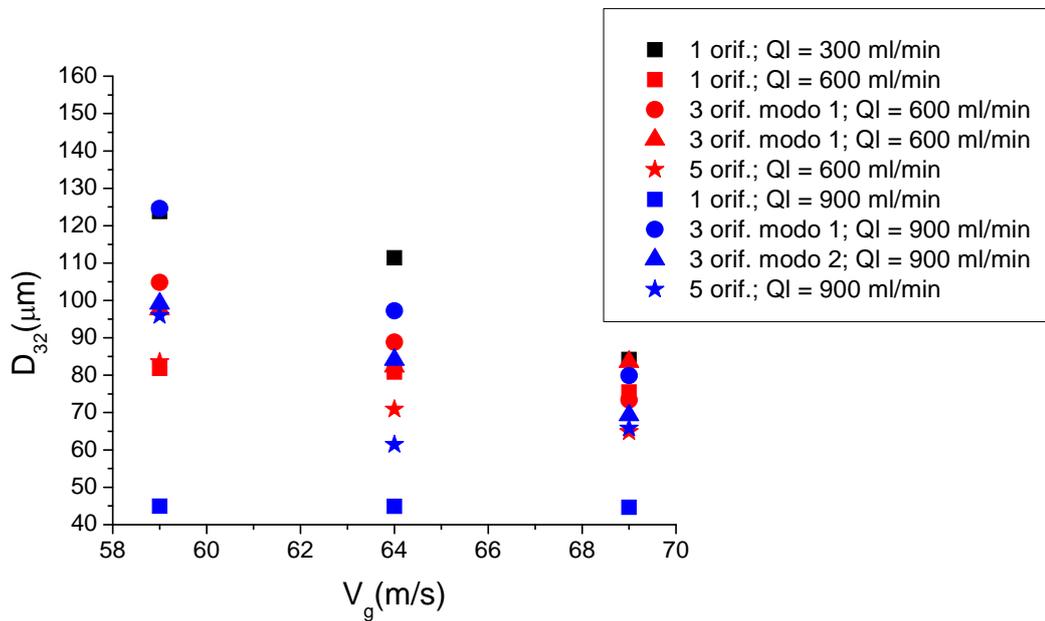


Figura A5 – Variação do D_{32} experimental em função da velocidade para as diferentes vazões e números de injeção de líquido, para $x = 240 \text{ mm}$.

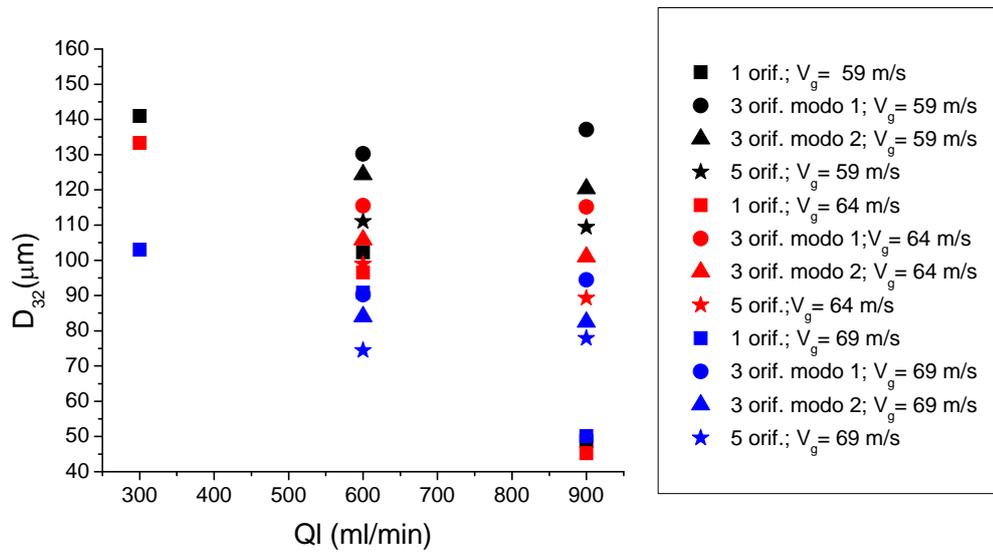


Figura A6 – Variação do D_{32} experimental em função da vazão de líquido (QI) para as diferentes velocidades e números de injeção de líquido, para $x = 180$ mm.

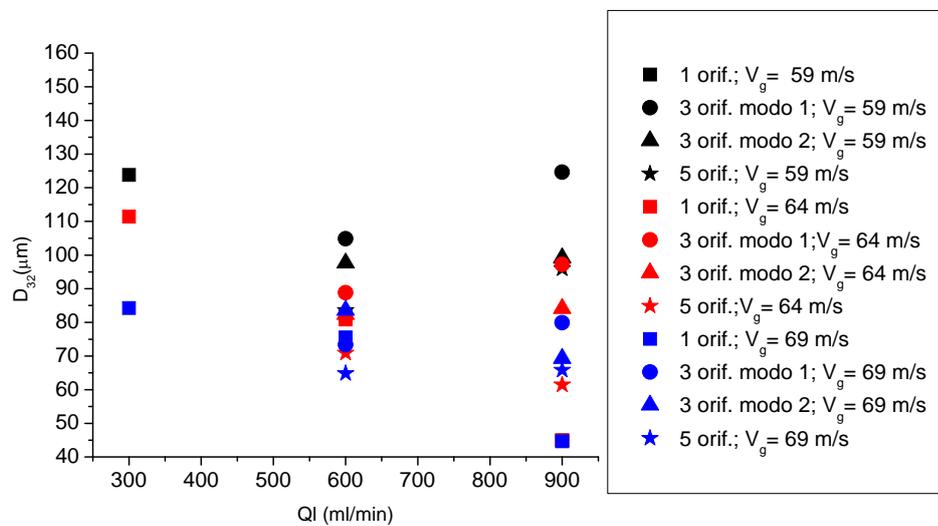


Figura A7 – Variação do D_{32} experimental em função da vazão de líquido (QI) para as diferentes velocidades e números de injeção de líquido, para $x = 240$ mm.

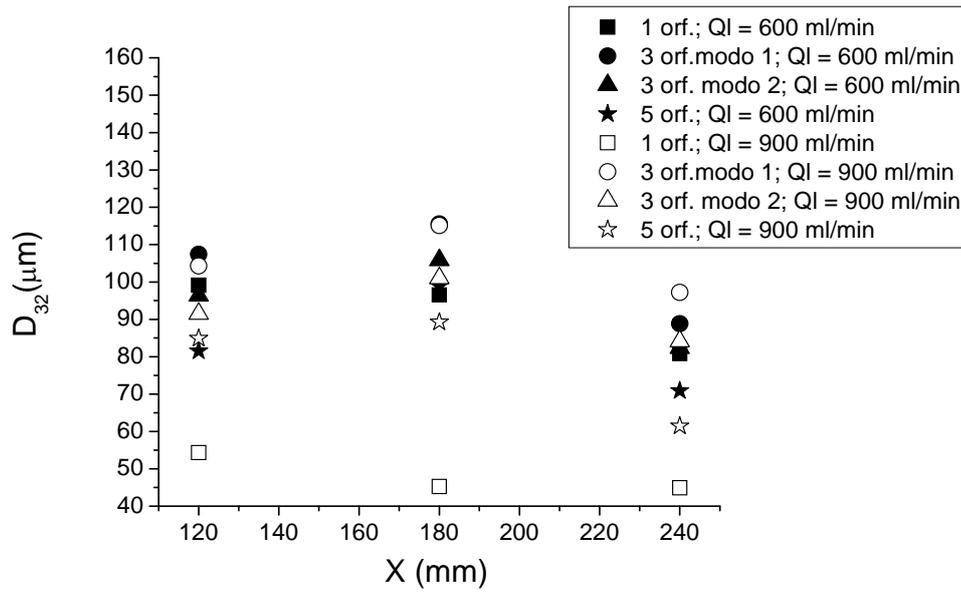


Figura A8 – Variação do D_{32} experimental em função da posição axial em que foram realizadas as medidas para as diferentes vazões de líquido e números de injeção de líquido, para $V_g = 64$ m/s.

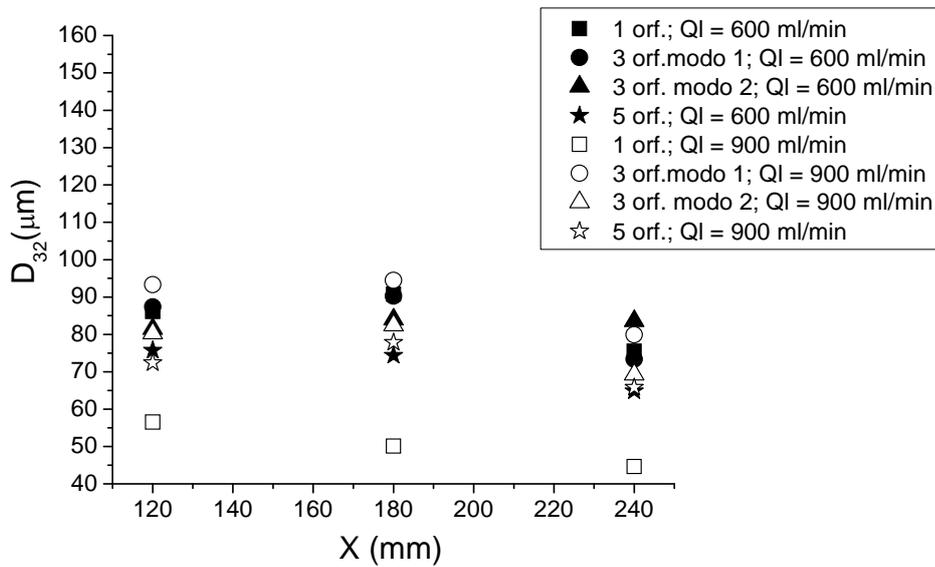


Figura A9 – Variação do D_{32} experimental em função da posição axial em que foram realizadas as medidas para as diferentes vazões de líquido e números de injeção de líquido, para $V_g = 69$ m/s.

APÊNDICE B

Resultados experimentais do Novo lavador Venturi

Tabela B1 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 59$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,079	137,17	131,60	166,60	147,59	124,52
0,08	133,01	132,82	166,39	147,92	125,05
0,09	99,83	140,33	163,06	148,86	128,96
0,1	79,52	141,13	158,02	146,47	130,98
0,11	68,65	137,93	151,98	142,23	131,85
0,12	63,78	133,45	145,63	137,58	132,36
0,13	61,46	130,41	139,69	133,99	133,27
0,14	58,27	130,60	134,69	132,47	135,09
0,15	50,77	130,84	130,16	131,66	137,01
0,16		126,28	125,33	129,42	137,76
0,17		115,01	120,11	125,02	136,70
0,18		101,64	115,98	120,96	134,72
0,19		91,36	114,50	119,94	132,80
0,2		85,00	115,46	121,52	131,19
0,21		80,02	117,25	122,83	129,53
0,22		74,49	118,25	121,53	127,57
0,23		69,30	116,84	117,78	125,60
0,24		65,99		112,33	124,02
0,25		65,09		106,04	123,11
0,26		65,28		99,87	122,85
0,27		65,12		94,75	123,17
0,28		63,14		90,91	123,85
0,29				88,17	124,51
0,3				86,34	124,79
0,31				85,23	124,35

Tabela B2 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 64$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,072	125,63	108,59	136,79	130,00	114,15
0,08	117,71	113,10	134,35	132,43	117,86
0,09	104,22	116,71	130,51	132,63	122,88
0,1	88,39	118,23	126,20	130,51	127,63
0,11	72,01	117,82	121,85	126,96	131,40
0,12	56,82	115,65	117,91	122,87	133,43
0,13	44,62	111,98	114,66	119,06	133,20
0,14	37,16	107,64	111,67	115,88	131,30
0,15		103,60	108,25	113,57	128,67
0,16		99,77	104,68	112,00	125,95
0,17		95,04	102,19	110,72	123,49
0,18		88,75	101,45	109,46	121,47
0,19		81,70	101,37	108,51	119,63
0,2		74,95	100,55	108,16	117,65
0,21		69,14	97,56	107,58	115,58
0,22		64,68		105,27	113,67
0,23		61,63		100,91	112,21
0,24		59,43		96,17	111,65
0,25		57,52		92,55	112,24
0,26		55,31		89,86	113,31
0,27				87,27	113,90
0,28				84,00	113,03

Tabela B3 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 69$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,067	115,94	99,56	119,04	106,83	95,01
0,07	111,46	100,23	118,18	107,43	95,98
0,08	95,93	102,06	114,34	108,54	101,13
0,09	80,26	103,33	109,73	108,48	107,84
0,1	65,46	104,05	105,29	107,48	114,21
0,11	52,58	104,25	101,95	105,79	118,39
0,12	42,63	103,85	100,42	103,65	118,83
0,13	36,66	102,03	99,52	101,21	116,46
0,14		97,78	97,37	98,62	113,24
0,15		91,99	93,74	96,19	110,24
0,16		86,98	89,73	94,39	107,79
0,17		82,84	86,22	93,38	105,93
0,18		75,85	83,72	92,81	104,12
0,19		64,43	82,70	92,36	102,03
0,2		54,59	83,65	91,90	100,05
0,21		52,25		91,27	98,62
0,22		55,30		89,81	97,71
0,23		58,90		86,78	97,13
0,24		58,24		82,63	96,79
0,25				78,70	96,68
0,26				76,34	96,78

Tabela B4 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 120$ mm e $V_g = 74$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,063	95,46	82,56	101,13	87,52	77,13
0,07	89,63	84,84	100,08	91,91	80,22
0,08	77,36	86,03	98,44	94,76	86,25
0,09	62,86	85,72	96,56	94,87	92,38
0,1	48,85	84,91	94,30	93,68	96,61
0,11	38,01	84,55	91,60	92,54	97,13
0,12	33,06	84,76	89,23	91,49	95,12
0,13		84,96	88,53	89,56	93,92
0,14		84,50	88,70	86,85	93,96
0,15		82,64	86,88	84,42	92,78
0,16		79,23	82,51	82,80	89,81
0,17		74,84	78,19	81,67	87,12
0,18		70,00	75,47	80,59	85,81
0,19		65,09	73,86	79,09	85,06
0,2		60,46	72,63	77,06	84,15
0,21		56,41		75,27	83,10
0,22		53,25		74,28	81,99
0,23				73,68	80,84
0,24				72,88	79,66
0,25				71,27	78,45

Tabela B5 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 59$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,078	66,09	124,64	143,73	131,70	120,45
0,08	62,69	125,19	141,68	132,34	120,80
0,09	48,40	127,08	133,50	133,73	124,20
0,1	38,14	127,35	127,87	132,76	129,28
0,11	31,20	125,80	123,50	130,32	134,66
0,12	26,88	122,22	119,12	127,32	138,98
0,13	24,45	116,39	113,47	124,66	140,86
0,14	23,21	108,24	105,63	123,05	139,34
0,15	22,45	98,50	96,77	122,05	135,64
0,16		88,20	88,73	120,87	131,69
0,17		78,24	82,72	119,08	128,59
0,18		69,47	78,86	116,88	125,99
0,19		62,63	77,11	114,46	123,41
0,2		57,85	76,89	111,38	120,92
0,21		54,90	77,25	106,80	118,85
0,22		53,36	77,24	100,31	117,39
0,23		52,26	75,92	92,75	116,26
0,24		50,59		85,18	115,12
0,25		48,22		78,46	113,57
0,26		45,99		73,27	111,19
0,27		44,73		70,14	107,67
0,28		45,32		68,47	103,41
0,29				67,14	99,15
0,3				65,06	95,63
0,31				61,11	93,57

Tabela B6 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 64$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,072	77,99	97,22	121,57	99,88	93,06
0,08	60,37	95,20	115,80	106,32	98,04
0,09	45,26	96,06	111,84	108,95	102,72
0,1	36,19	98,72	109,77	107,55	106,14
0,11	31,42	101,07	107,75	104,26	108,76
0,12	29,19	100,98	103,94	101,21	111,04
0,13	27,74	96,86	97,06	100,01	113,24
0,14	25,33	89,85	88,83	99,25	114,39
0,15		82,00	81,91	96,68	113,18
0,16		74,33	77,09	92,64	109,60
0,17		66,87	73,31	90,14	104,99
0,18		59,77	69,76	90,67	100,56
0,19		53,67	66,73	90,93	97,13
0,2		49,22	64,66	87,23	95,30
0,21		46,29	64,02	80,66	94,62
0,22		44,27		75,15	94,01
0,23		42,71		72,51	92,81
0,24		41,48		70,91	91,12
0,25		40,43		68,52	89,11
0,26		39,46		65,37	86,85
0,27				62,12	84,37
0,28				59,43	81,72

Tabela B7 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 69$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,067	80,05	85,34	104,41	85,94	75,81
0,07	74,55	84,80	104,42	87,16	76,57
0,08	58,62	83,82	102,70	89,20	80,34
0,09	46,10	83,69	99,08	88,96	85,21
0,1	36,68	83,92	94,62	87,50	90,18
0,11	30,01	84,00	90,41	85,85	94,24
0,12	25,78	83,43	87,29	84,92	96,50
0,13	23,66	81,84	84,38	84,42	96,94
0,14		78,90	80,16	83,57	95,91
0,15		74,40	74,99	82,25	93,85
0,16		68,27	70,67	80,88	91,27
0,17		61,02	67,95	79,81	88,74
0,18		54,13	65,64	79,32	86,85
0,19		48,72	62,41	79,18	85,79
0,2		44,61	56,91	77,70	84,30
0,21		41,42		73,50	81,31
0,22		38,97		68,41	77,92
0,23		37,19		65,18	75,87
0,24		35,99		63,97	75,48
0,25				62,98	75,96
0,26				60,34	76,49

Tabela B8 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,063	84,77	80,74	96,85	77,34	73,57
0,07	68,72	80,92	95,69	78,05	73,32
0,08	53,44	80,57	91,59	79,27	76,59
0,09	44,87	79,88	86,14	80,27	81,98
0,1	40,43	79,28	81,08	80,51	87,13
0,11	37,56	79,12	77,95	79,55	89,81
0,12	33,70	78,43	75,68	77,76	89,81
0,13		75,32	71,35	76,15	88,50
0,14		69,85	64,99	75,06	86,85
0,15		64,07	59,64	74,15	85,36
0,16		59,00	56,72	73,13	83,93
0,17		54,26	55,37	71,78	81,69
0,18		49,58	54,62	70,31	78,59
0,19		45,09		69,55	76,04
0,2		40,99		69,59	74,76
0,21		37,62		68,68	73,59
0,22		35,33		65,57	71,66
0,23				61,24	69,71
0,24				57,08	68,79
0,25				54,48	69,92

Tabela B9 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 59$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,078	53,77	132,21	138,10	137,28	116,54
0,08	52,55	132,36	137,44	139,24	115,89
0,09	47,33	130,60	134,62	145,10	115,43
0,1	43,32	125,28	132,04	145,56	118,40
0,11	40,27	117,29	128,97	142,33	123,08
0,12	37,96	107,48	124,69	137,14	127,76
0,13	36,13	96,75	118,47	131,68	130,71
0,14	34,55	85,95	109,96	127,39	130,61
0,15	32,96	75,94	100,79	124,19	128,27
0,16		67,53	93,23	121,46	125,19
0,17		61,04	88,49	118,62	122,49
0,18		55,88	85,98	115,11	120,64
0,19		51,41	84,93	110,41	119,91
0,2		47,53	84,70	104,75	119,61
0,21		44,43	84,75	98,73	118,46
0,22		42,22	84,50	92,87	115,76
0,23		40,79	83,40	87,40	112,58
0,24		39,94		82,46	110,27
0,25		39,58		78,12	108,97
0,26		39,64		74,34	107,67
0,27		40,06		71,09	105,44
0,28		40,79		68,39	102,32
0,29				66,29	98,80
0,3				64,84	95,36
0,31				64,09	92,51

Tabela B10 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 64$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,072	54,05	90,05	106,10	93,13	79,17
0,08	44,43	86,89	103,48	98,44	79,81
0,09	35,86	86,24	99,71	101,60	83,17
0,1	30,40	87,30	95,66	101,92	87,97
0,11	27,26	87,99	91,66	100,49	92,66
0,12	25,67	86,24	88,01	98,39	95,74
0,13	24,82	80,54	84,94	96,51	96,05
0,14	23,96	72,50	82,16	94,63	94,49
0,15		64,70	79,24	92,19	92,63
0,16		58,27	75,89	89,30	91,12
0,17		52,86	72,02	86,77	89,70
0,18		48,22	67,74	85,04	88,10
0,19		44,50	63,89	83,44	86,13
0,2		41,88	61,39	81,18	83,69
0,21		40,07	61,20	78,41	81,36
0,22		38,53		75,82	80,15
0,23		36,94		73,58	80,32
0,24		35,48		70,87	80,91
0,25		34,37		67,03	81,02
0,26		33,81		62,72	80,57
0,27				59,01	79,77
0,28				57,00	78,85

Tabela B11 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,067	54,65	82,44	96,00	86,68	77,23
0,07	51,41	82,32	95,49	87,85	77,43
0,08	42,21	82,71	92,85	90,54	78,89
0,09	35,17	83,61	89,27	91,67	81,09
0,1	29,95	84,12	85,39	91,60	83,44
0,11	26,19	83,35	81,85	90,69	85,37
0,12	23,53	80,52	79,17	89,29	86,31
0,13	21,63	75,73	76,78	87,55	86,12
0,14		69,49	73,69	85,54	84,86
0,15		62,64	69,85	83,29	83,04
0,16		56,30	65,89	80,82	81,52
0,17		50,94	62,29	78,19	80,71
0,18		45,98	59,28	75,57	80,29
0,19		41,09	57,03	73,10	79,89
0,2		37,14	55,72	70,84	79,26
0,21		34,94		68,80	78,21
0,22		34,10		66,89	76,89
0,23		33,81		64,98	75,55
0,24		33,27		62,93	74,34
0,25				60,60	73,37
0,26				57,85	72,72

Tabela B12 – Dados de tamanho de gotas referentes a $x = 240$ mm e $V_g = 74$ m/s

L/G (L/m ³)	D ₃₂ (μm)				
	1 orf.	2orf. –Modo 1	2 orf. – Modo 2	3 orf.	4 orf.
0,063	57,81	83,97	88,70	75,61	67,55
0,07	50,43	81,16	87,87	75,90	66,93
0,08	41,30	78,82	84,68	78,47	70,54
0,09	33,83	77,52	80,25	81,89	76,58
0,1	28,06	76,24	75,87	84,27	81,88
0,11	23,99	73,99	72,71	83,89	83,52
0,12	21,66	70,32	70,70	81,04	82,09
0,13		65,23	68,82	77,57	80,82
0,14		59,28	66,55	74,60	80,33
0,15		53,56	63,91	72,42	78,64
0,16		48,60	61,05	70,95	75,49
0,17		44,17	58,26	69,66	72,92
0,18		40,20	55,86	68,30	71,87
0,19		36,93		67,16	71,06
0,2		34,54		66,26	69,69
0,21		32,92		64,92	68,40
0,22		31,94		62,59	67,71
0,23				59,41	67,19
0,24				55,71	66,23
0,25				51,76	64,23

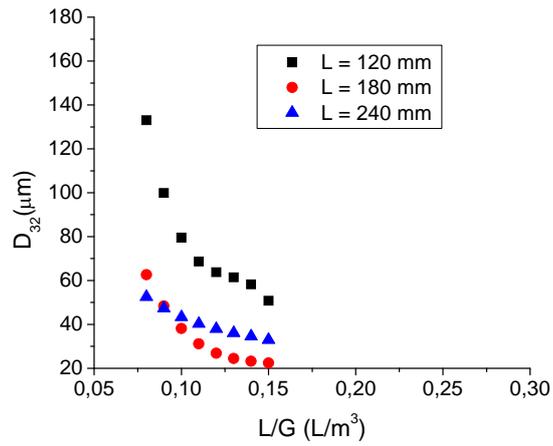


Figura B1 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 59$ m/s.

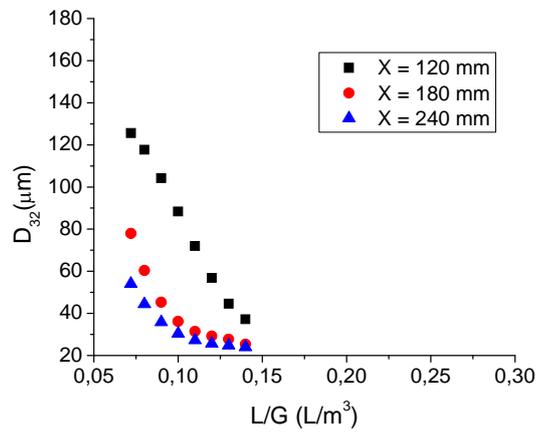


Figura B2 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 64$ m/s.

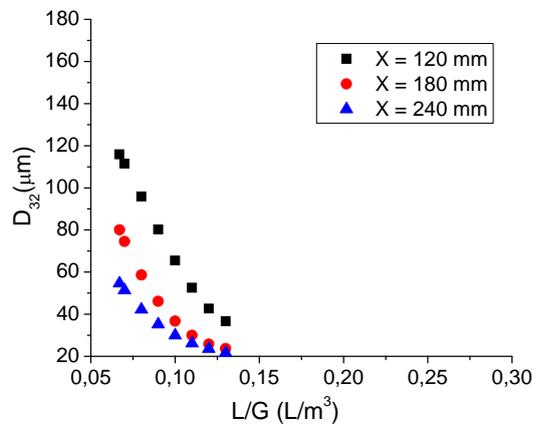


Figura B3 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 1 orifício $V_g = 69$ m/s.

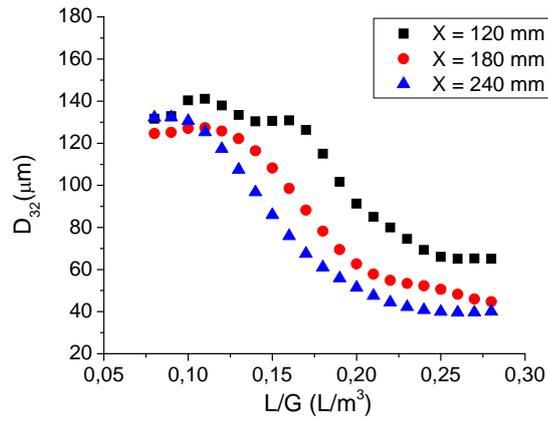


Figura B4 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 59$ m/s.

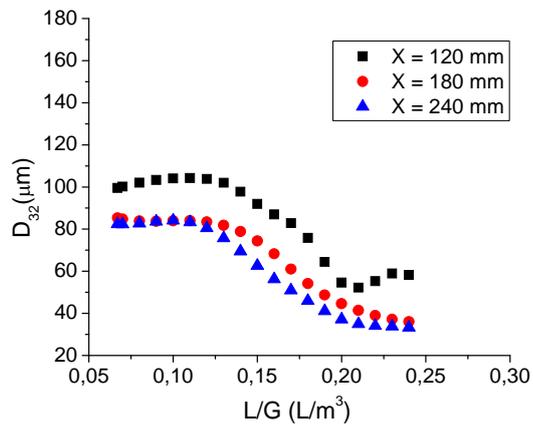


Figura B5 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 69$ m/s.

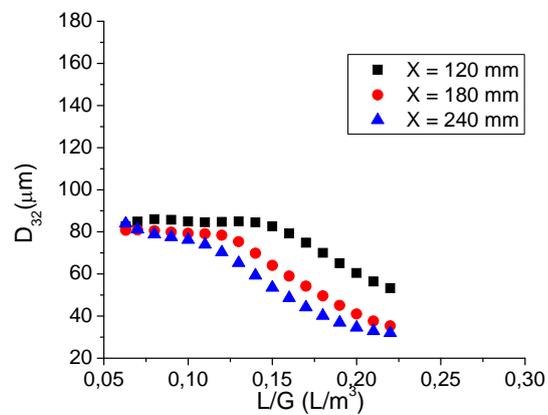


Figura B6 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 1 $V_g = 74$ m/s.

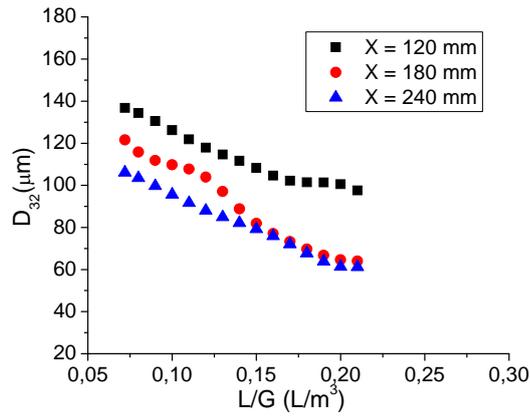


Figura B7 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 Vg = 64 m/s.

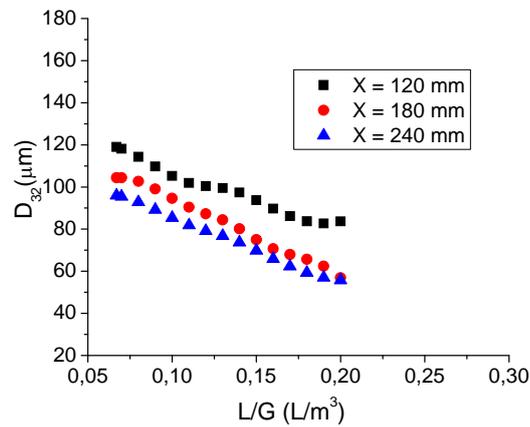


Figura B8 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 Vg = 69 m/s.

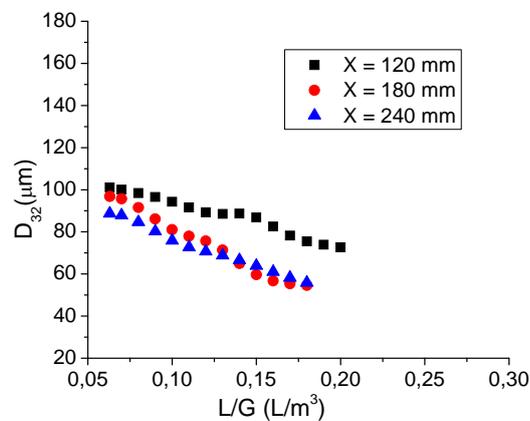


Figura B9 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 2 orifícios modo 2 Vg = 74 m/s.

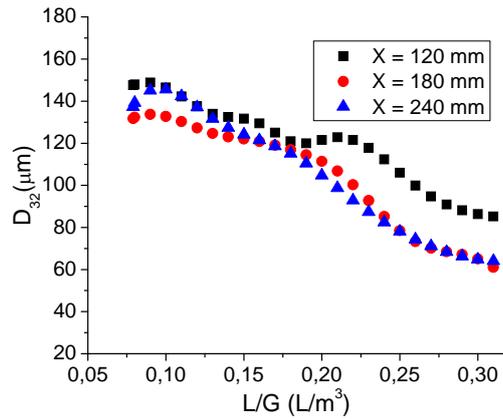


Figura B10 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 59$ m/s.

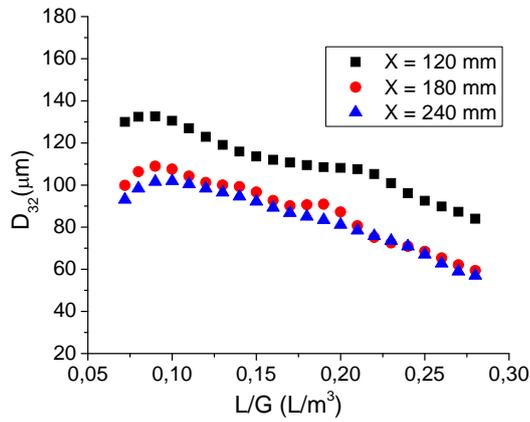


Figura B11 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 64$ m/s.

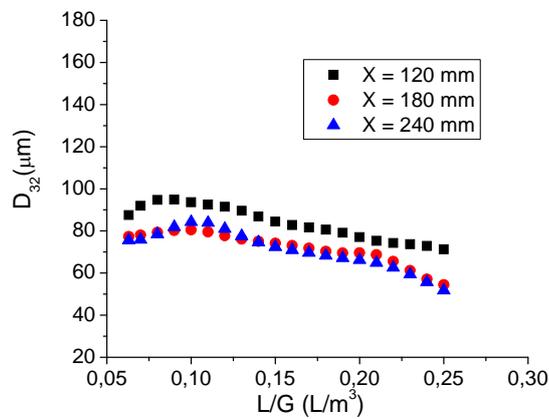


Figura B12 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 3 orifícios $V_g = 74$ m/s.

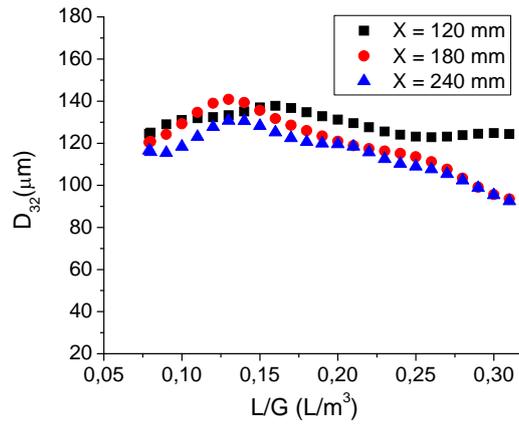


Figura B13 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 59$ m/s.

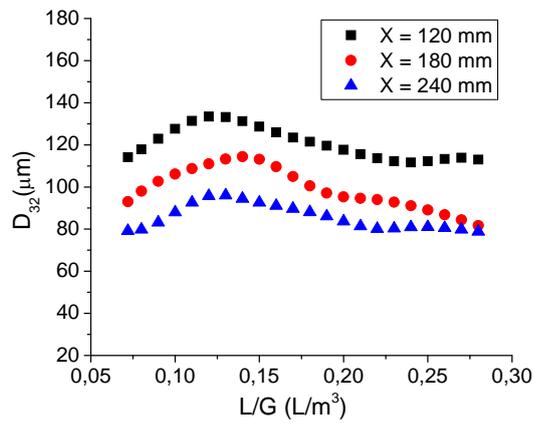


Figura B14 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 64$ m/s.

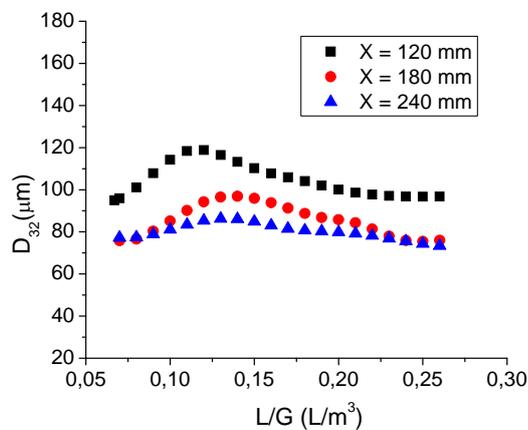


Figura B15 - Variação do diâmetro médio de Sauter com a distância de medida ao longo da garganta (x) para injeção através de 4 orifícios $V_g = 69$ m/s.

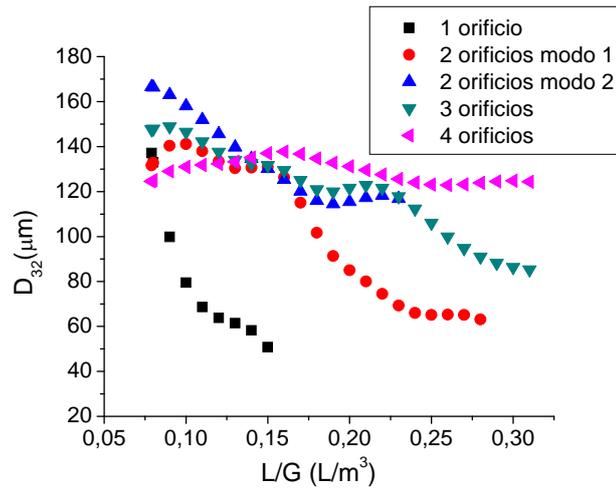


Figura B16 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 59$ m/s.

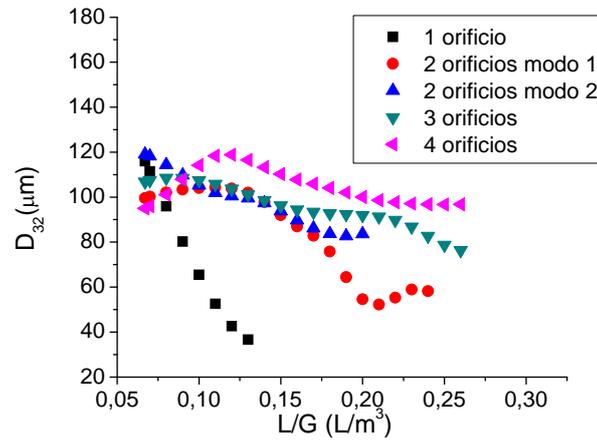


Figura B17 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 69$ m/s.

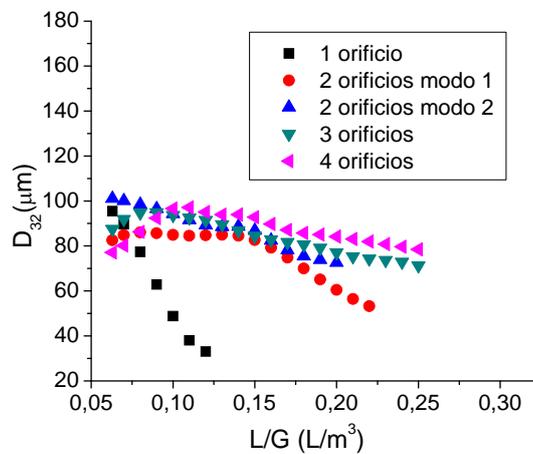


Figura B18 - Comparação entre as configurações para $x = 120$ mm e $V_g = 74$ m/s.

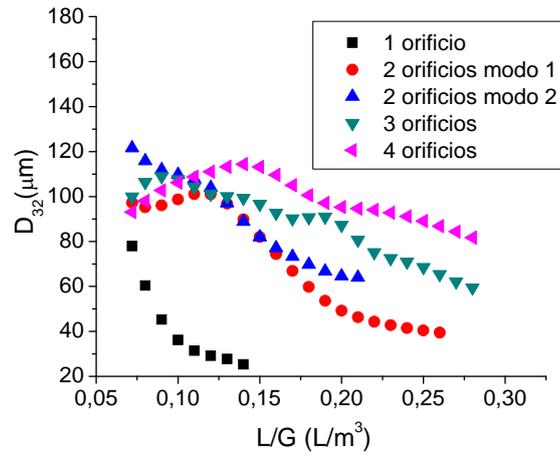


Figura B19 - Comparação entre as configurações para $x = 180$ mm e $V_g = 64$ m/s.

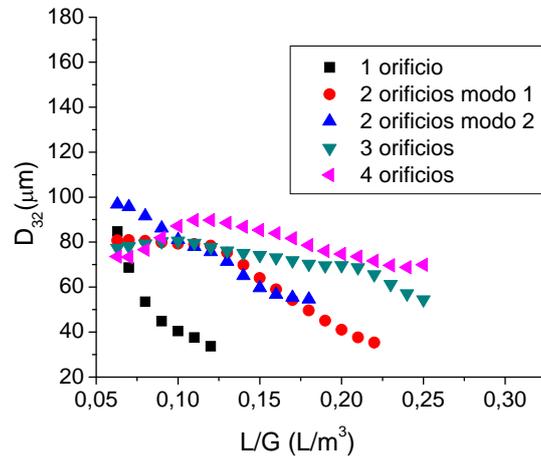


Figura B20 - Comparação entre as configurações para $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s.

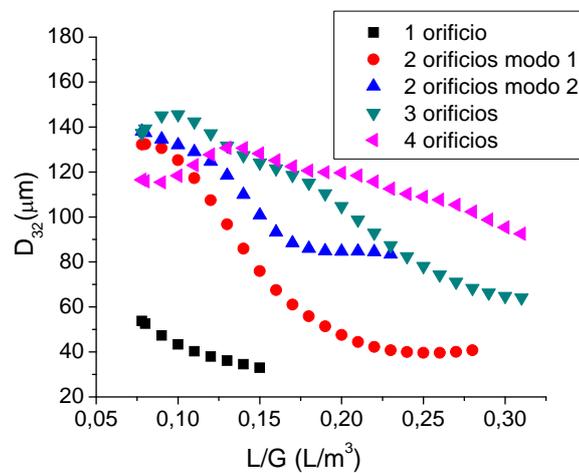


Figura B21 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 59$ m/s.

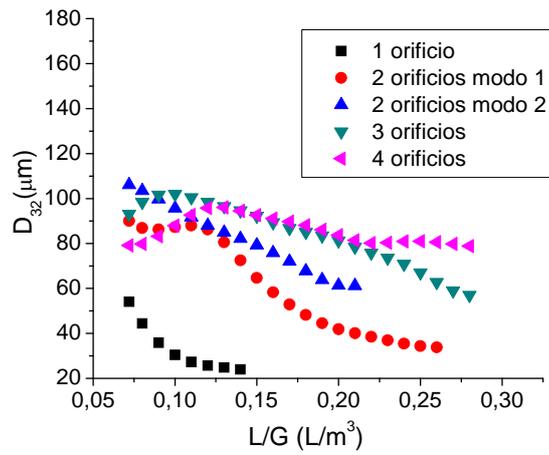


Figura B22 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 64$ m/s.

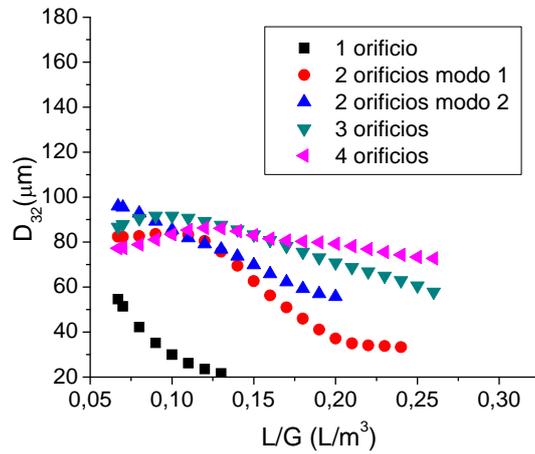


Figura B23 - Comparação entre as configurações para $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s.

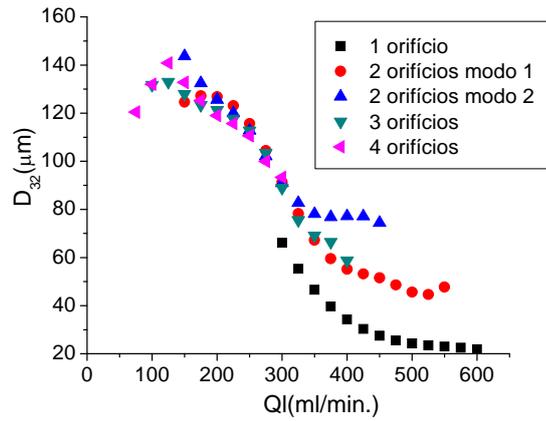


Figura B24 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 59$ m/s.

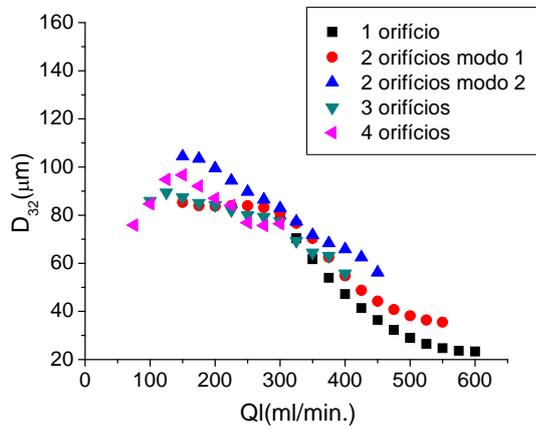


Figura B25 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 69$ m/s.

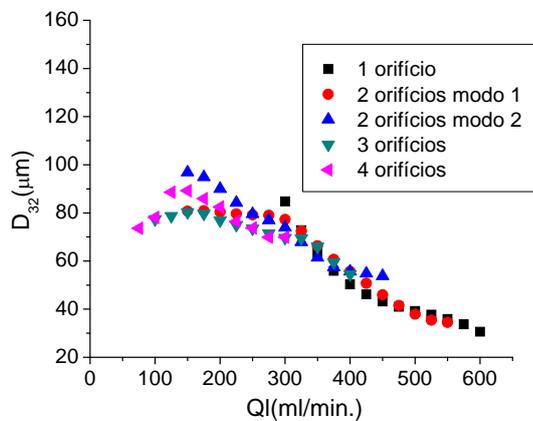


Figura B26 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 180$ mm e $V_g = 74$ m/s.

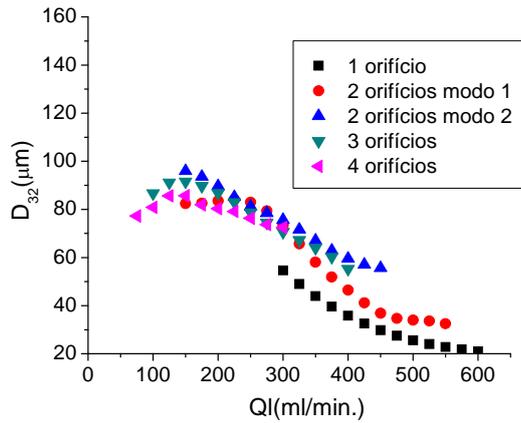


Figura B27 – Variação do diâmetro médio de Sauter com a vazão de líquido em cada orifício para $x = 240$ mm e $V_g = 69$ m/s.

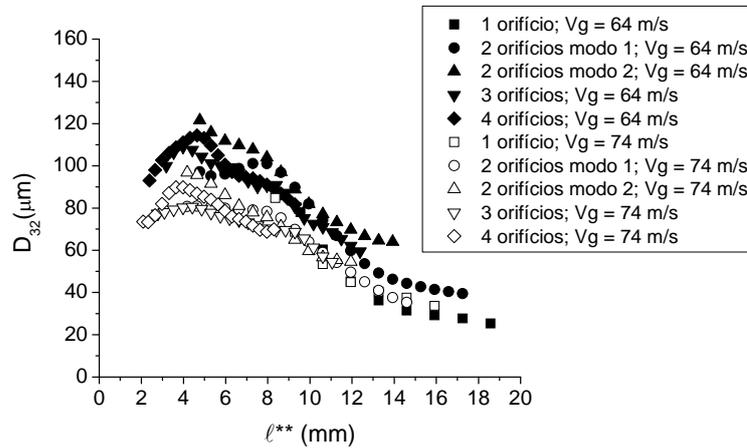


Figura B28 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (l^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s e $x = 180$ mm.

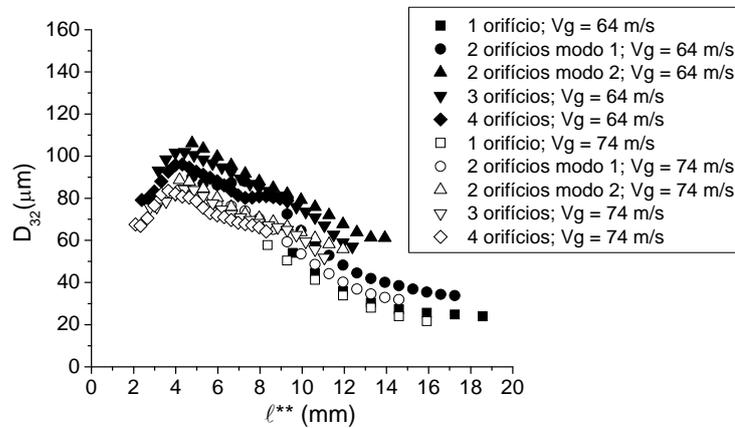


Figura B29 – Diâmetro médio de Sauter em função da penetração do jato (l^{**}) para as velocidades do gás de 64 m/s e 74 m/s e $x = 240$ mm.

Apresentação de alguns histogramas e curvas cumulativas típicos dos resultados obtidos nos experimentos do novo lavador Venturi.

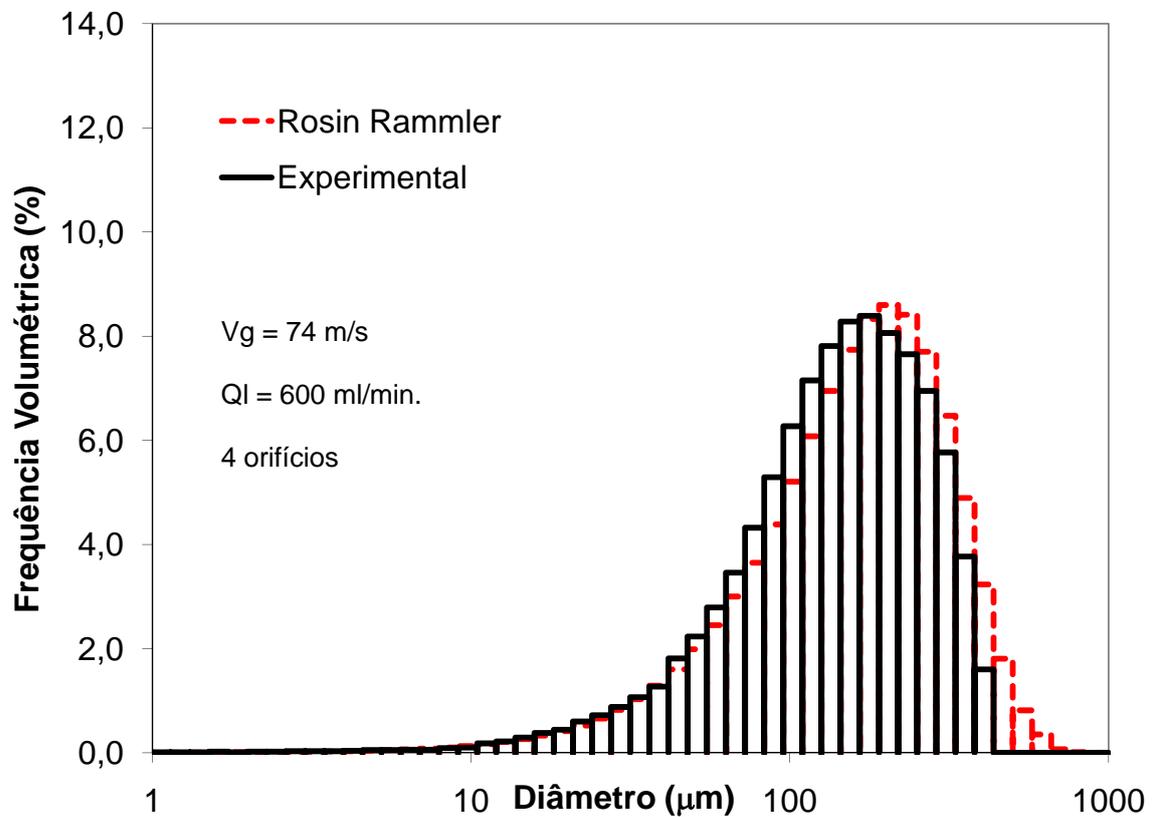
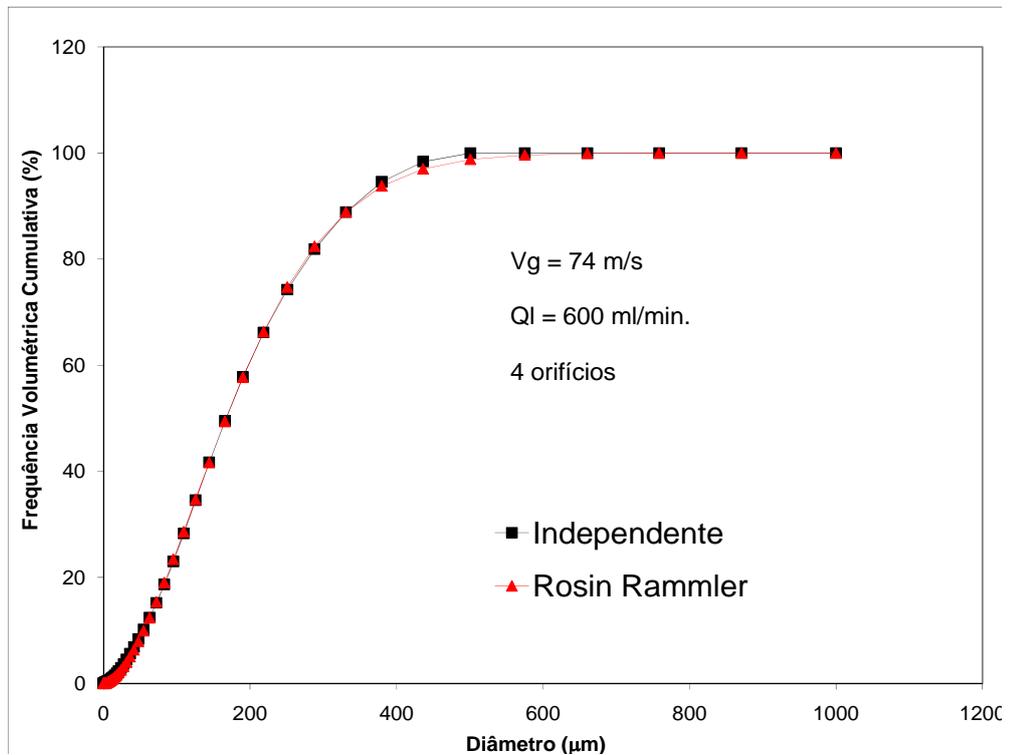


Figura B30 - Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min.}$, 4 orifícios e $x = 240 \text{ mm}$.

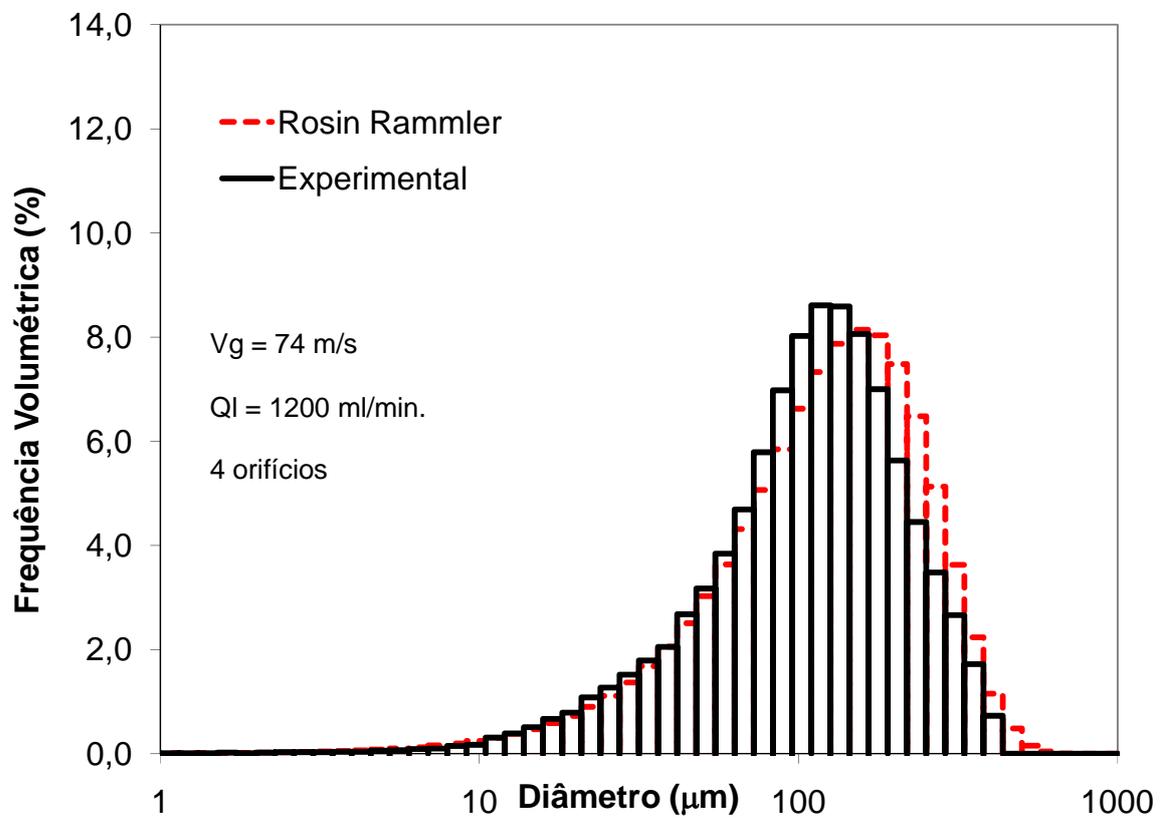
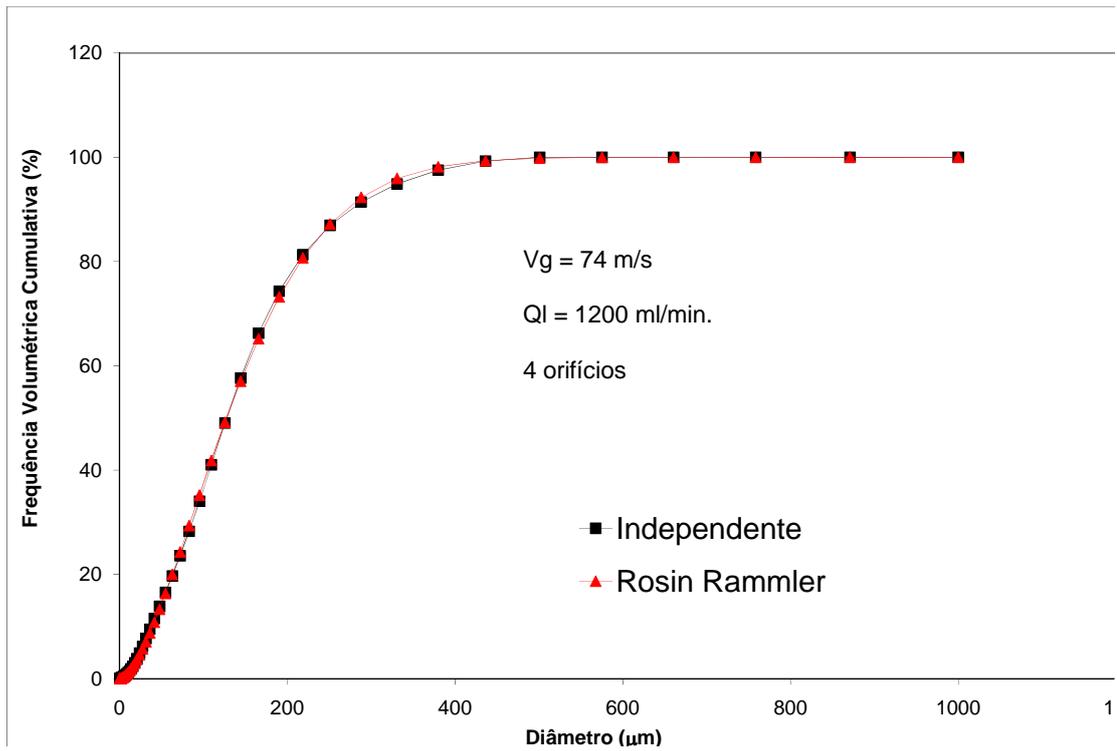


Figura B31 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74 \text{ m/s}$, $Q_l = 1200 \text{ mL/min.}$, 4 orifícios e $x = 240 \text{ mm}$.

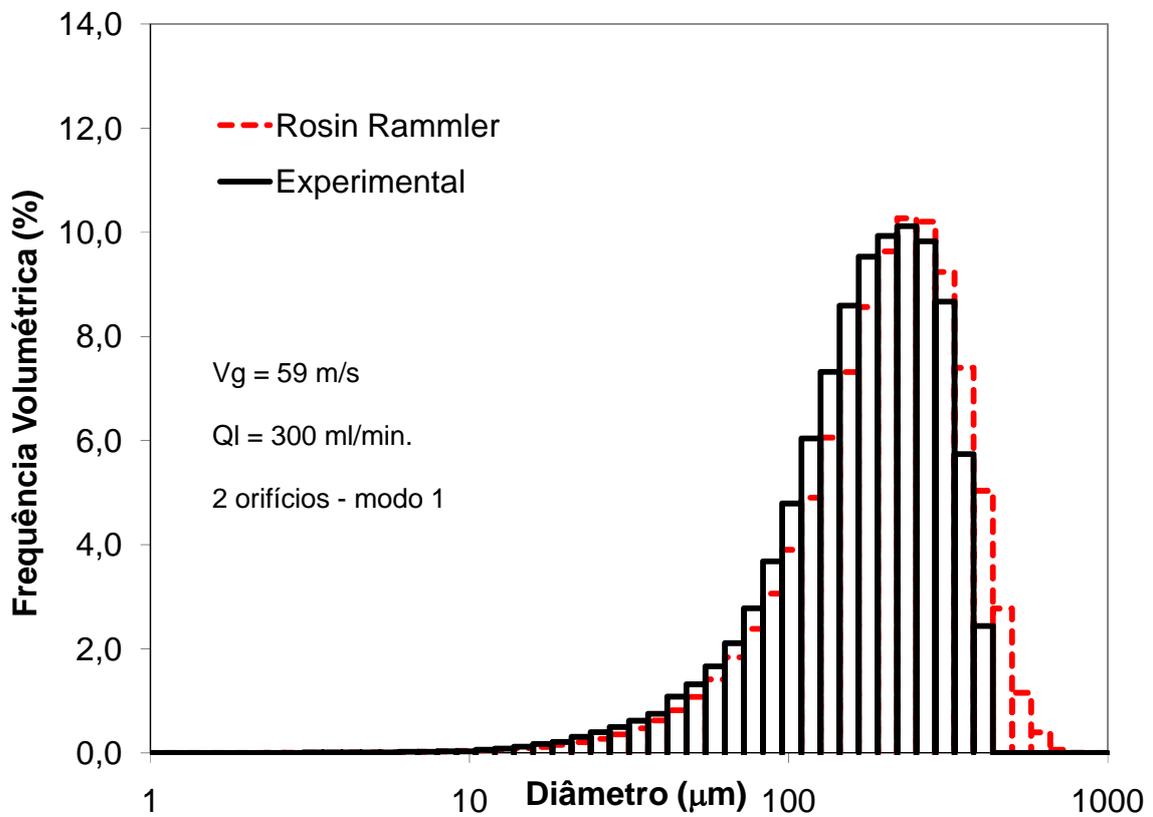
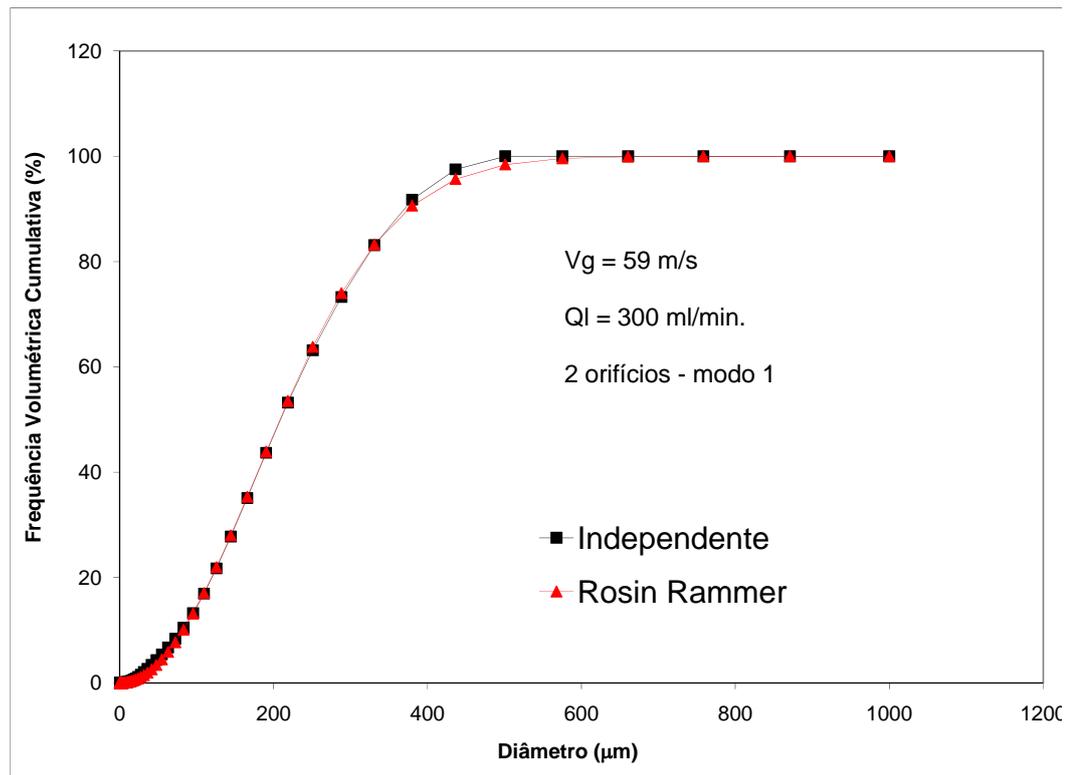


Figura B32 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59 \text{ m/s}$, $Q_l = 300 \text{ mL/min.}$, 2 orifícios - modo 1 e $x = 240 \text{ mm}$.

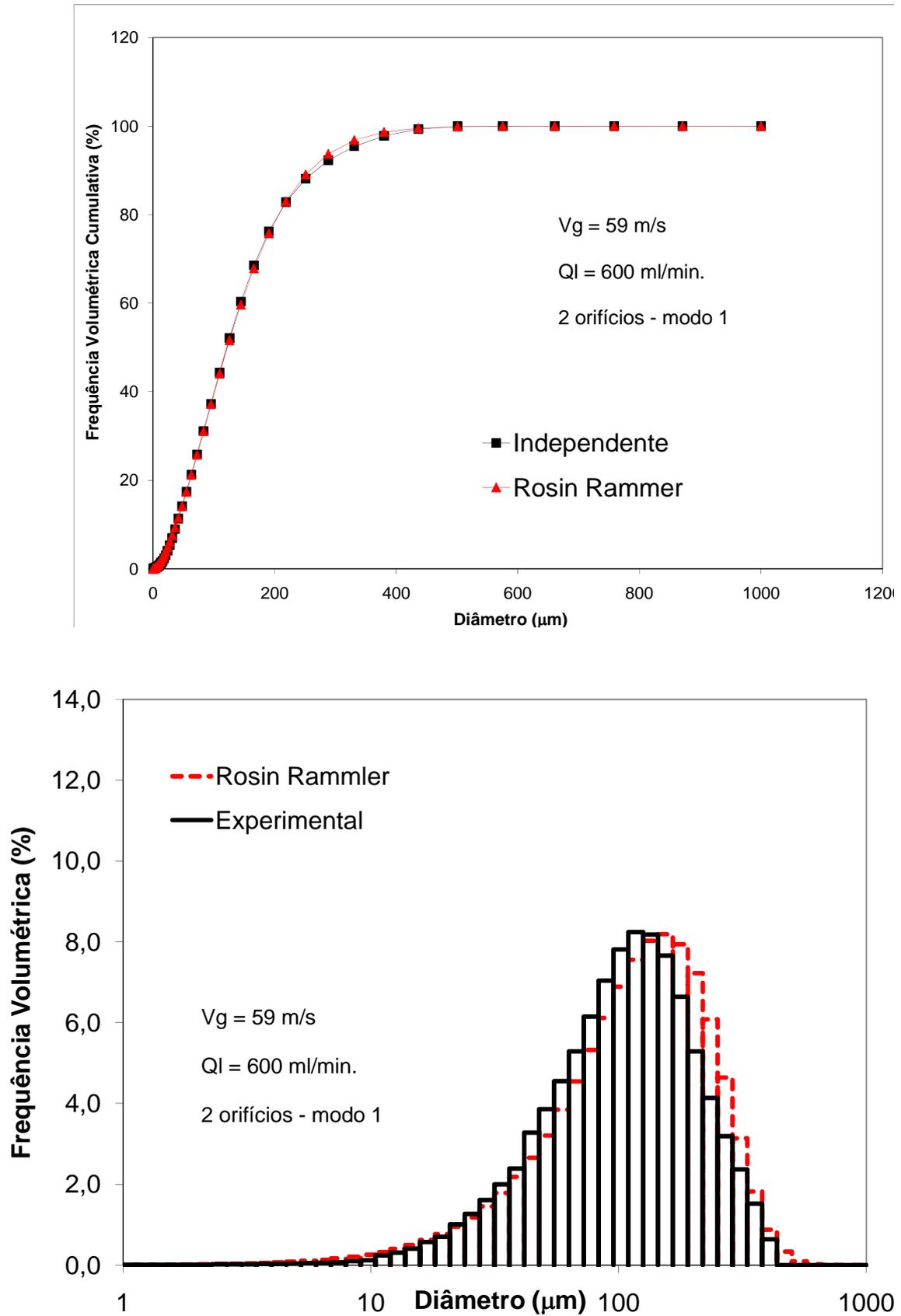


Figura B33 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 59 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min.}$, 2 orifícios - modo 1 e $x = 240 \text{ mm}$.

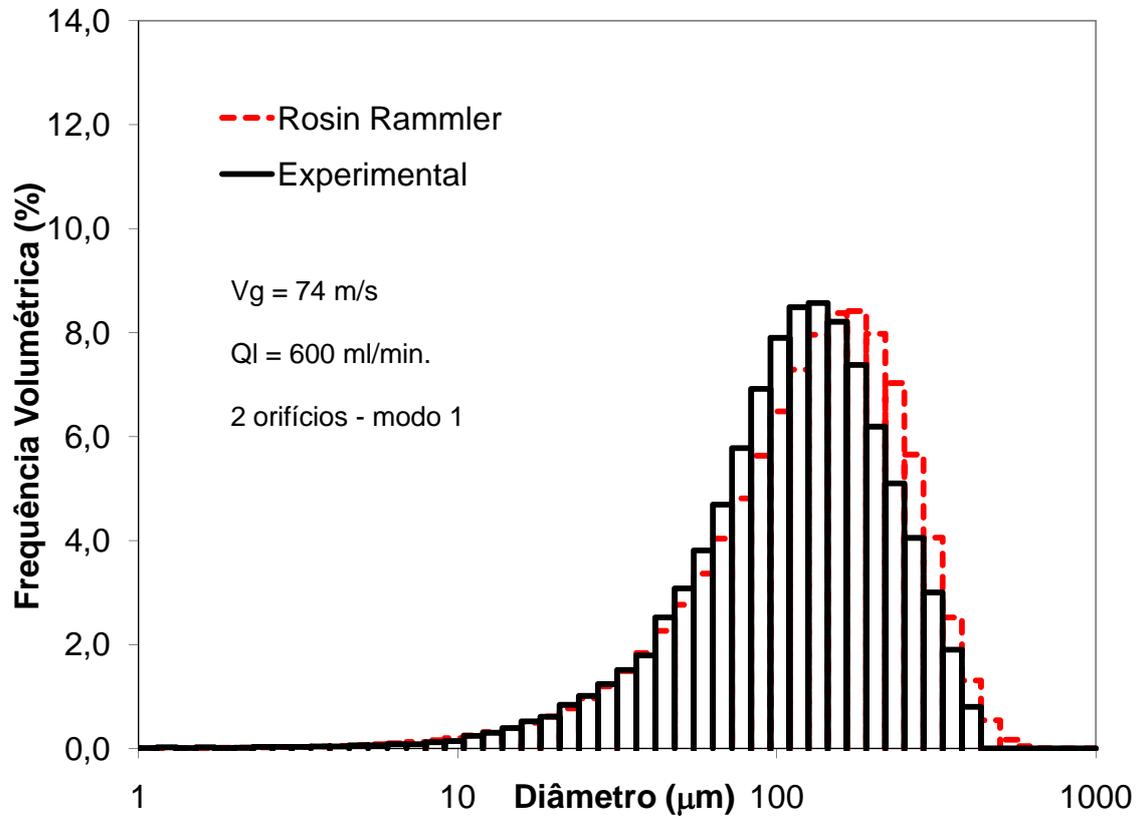
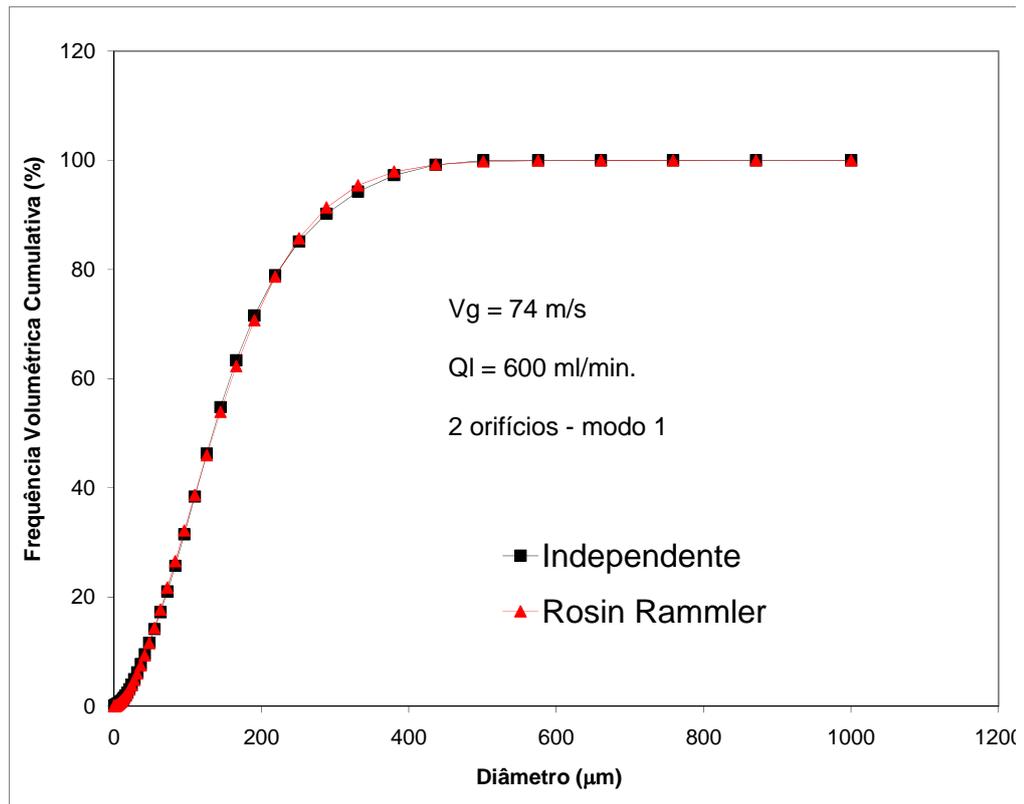


Figura B34 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 74 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min.}$, 2 orifícios - modo 1 e $x = 240 \text{ mm}$.

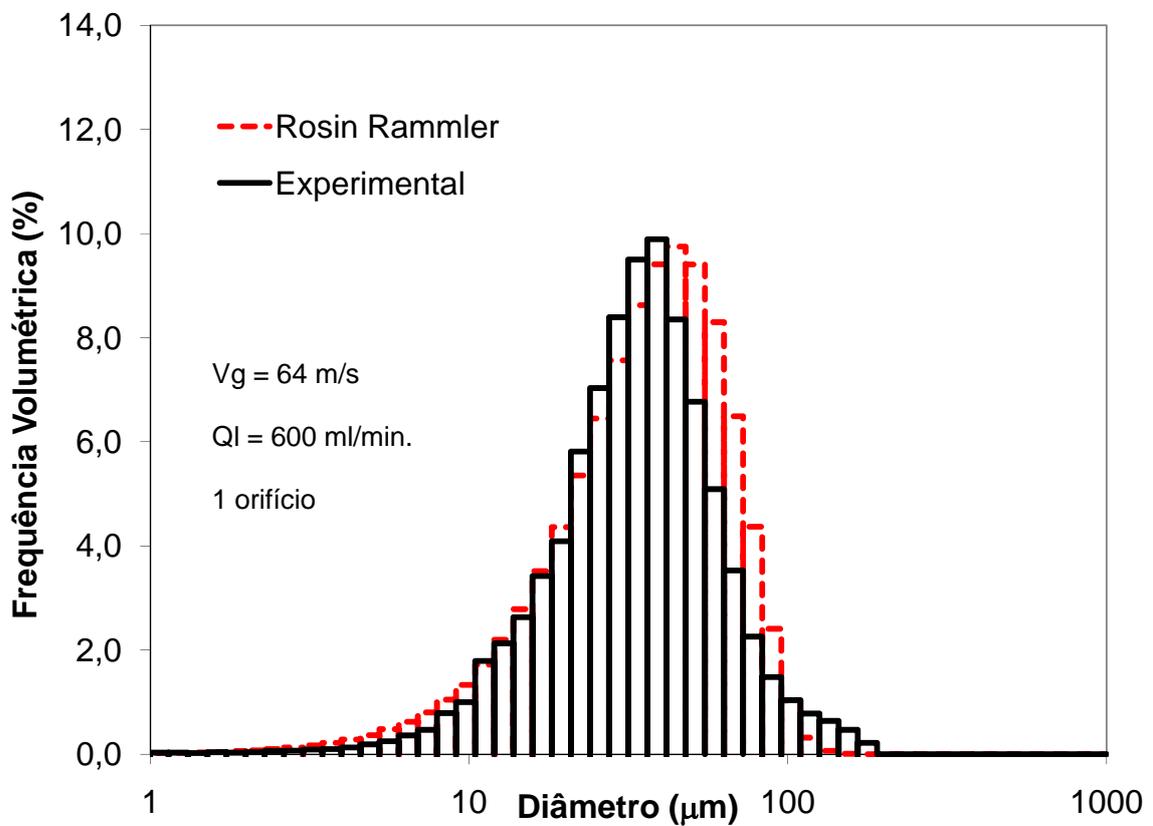
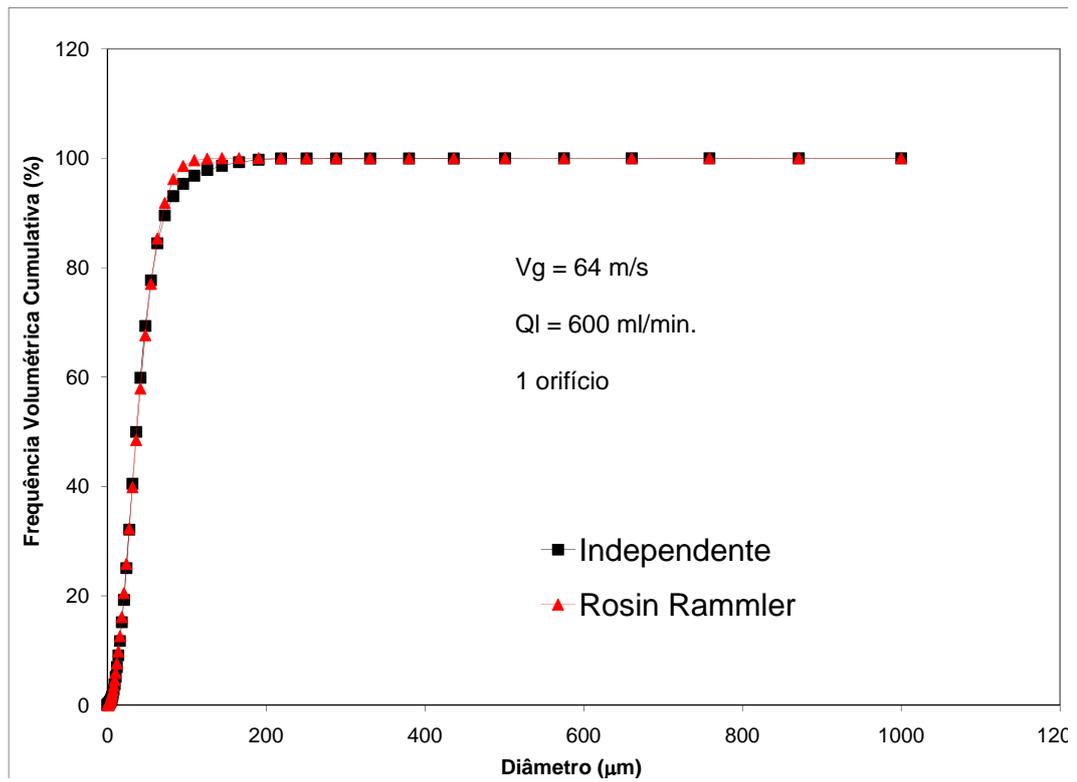


Figura B35 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 64 \text{ m/s}$, $Q_l = 600 \text{ mL/min.}$, 1 orifício e $x = 240 \text{ mm}$.

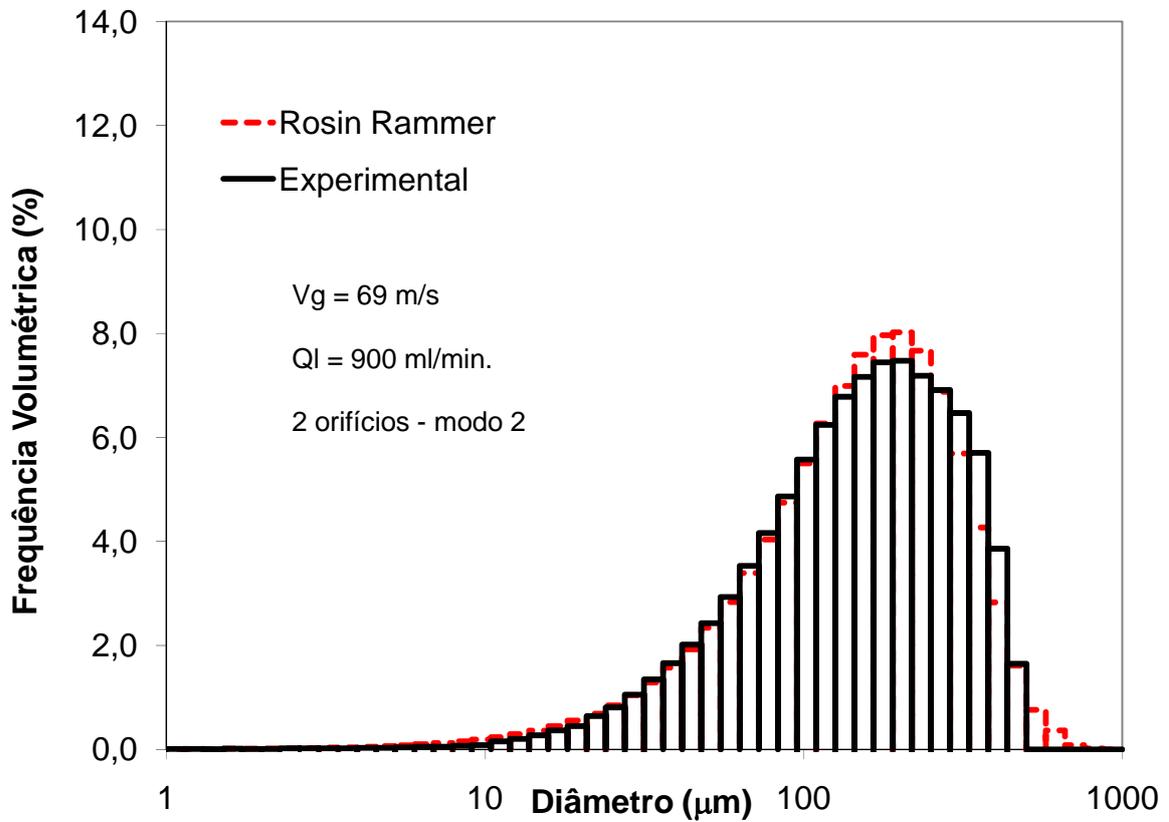
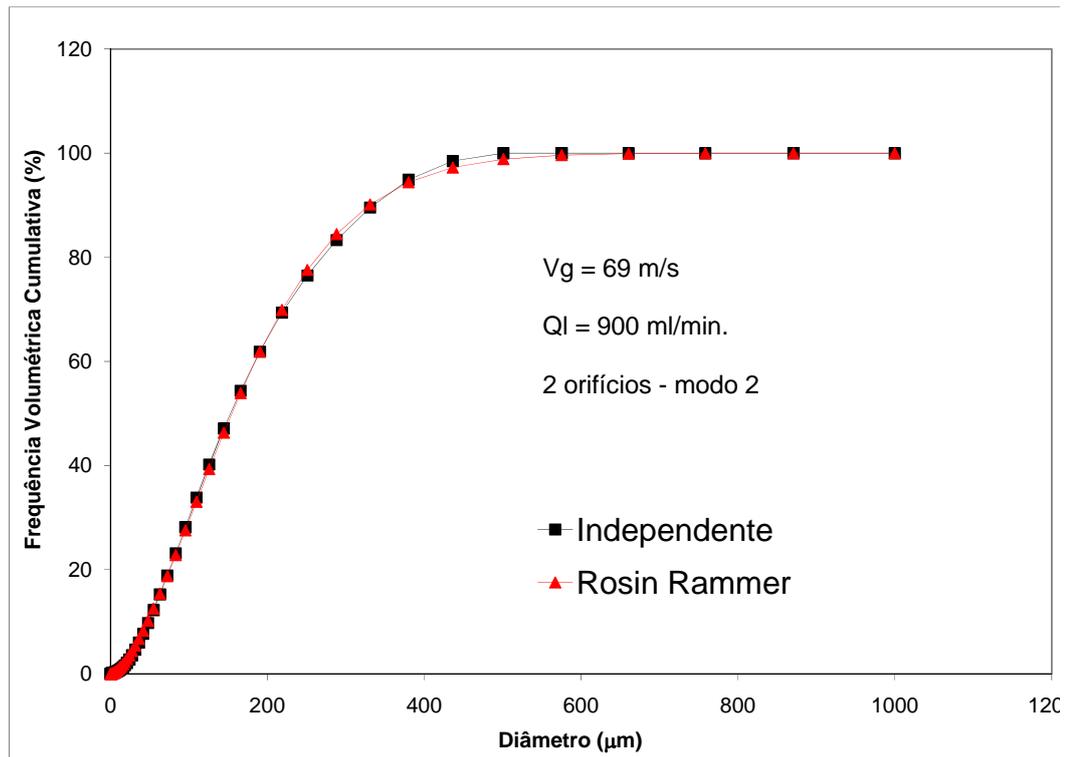


Figura B36 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69 \text{ m/s}$, $Q_l = 900 \text{ mL/min.}$, 2 orifícios –modo 2 e $x = 120 \text{ mm}$.

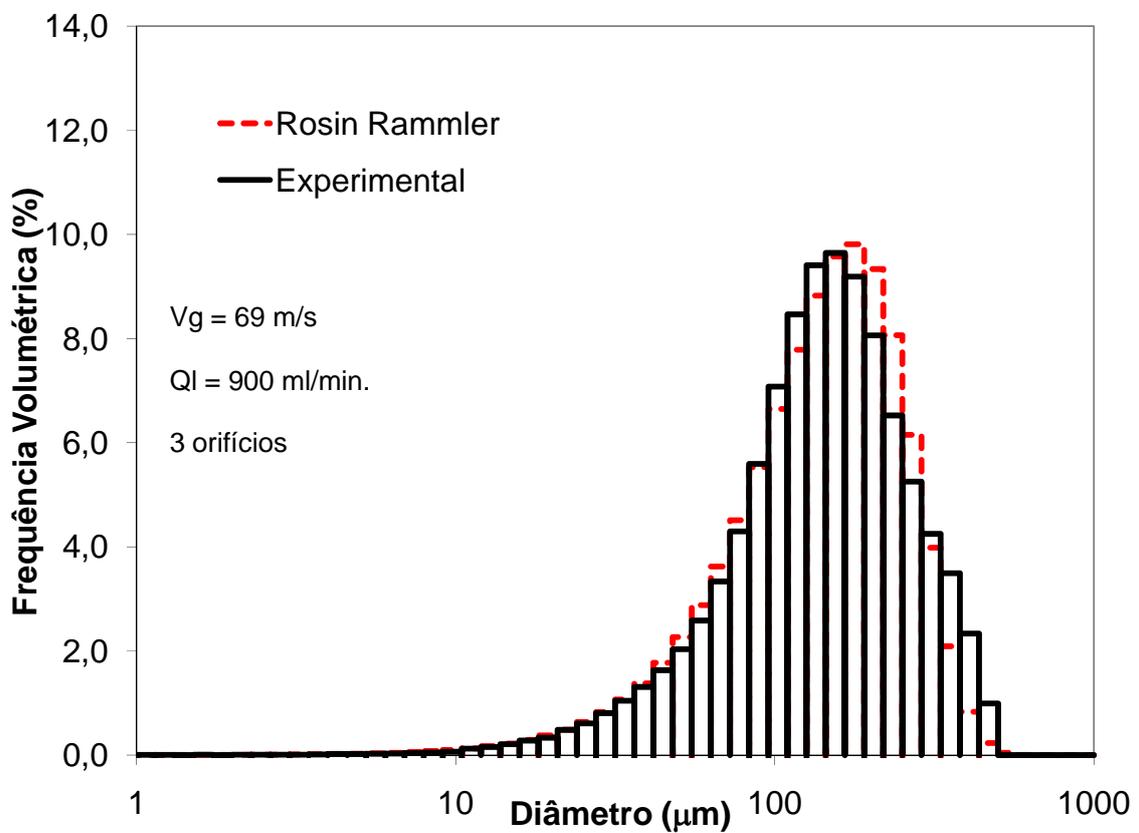
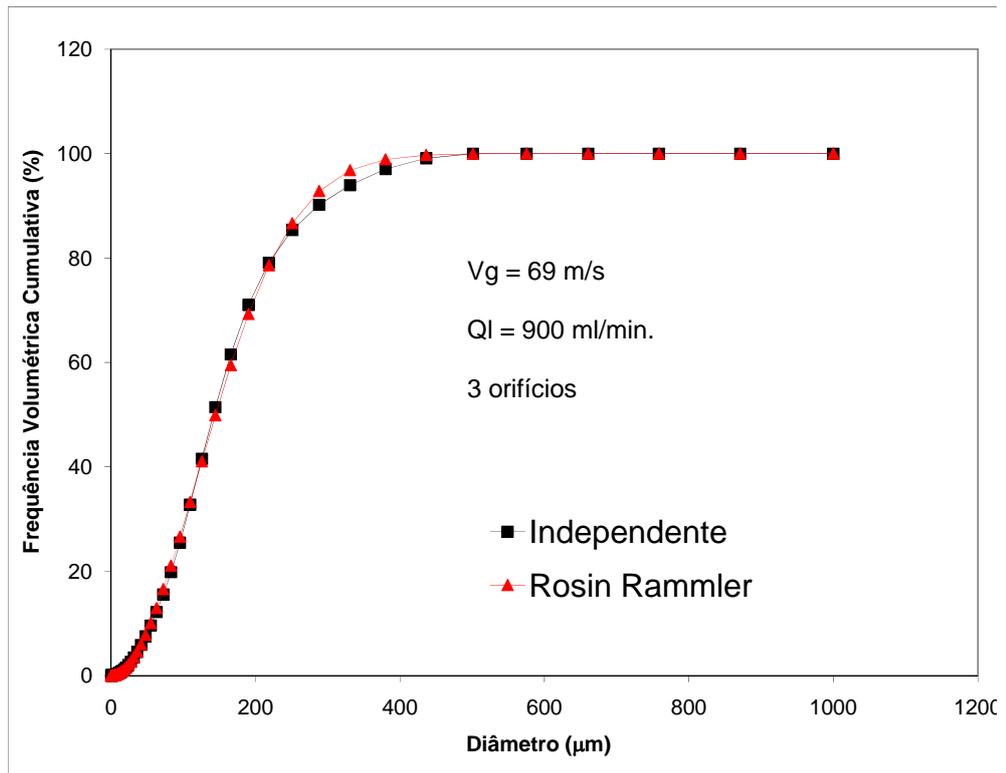


Figura B37 – Curva cumulativa e histograma da distribuição de tamanho de gotas $V_g = 69 \text{ m/s}$, $Q_l = 900 \text{ mL/min.}$, 3 orifícios e $x = 120 \text{ mm}$.

APÊNDICE C

Comparação entre os diâmetros de gotas medidos nos testes preliminares e os medidos no novo lavador Venturi para a injeção de líquido por um único orifício.

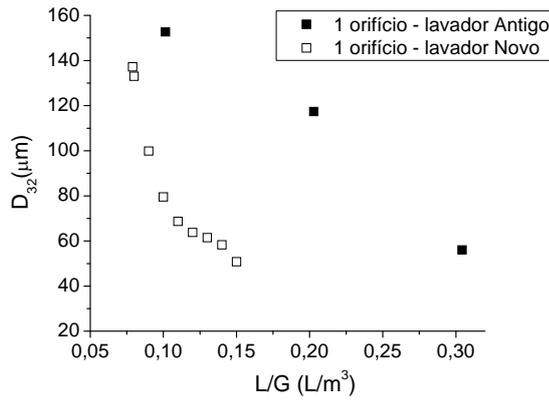


Figura C1- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 59 \text{ m/s}$ x = 120 mm.

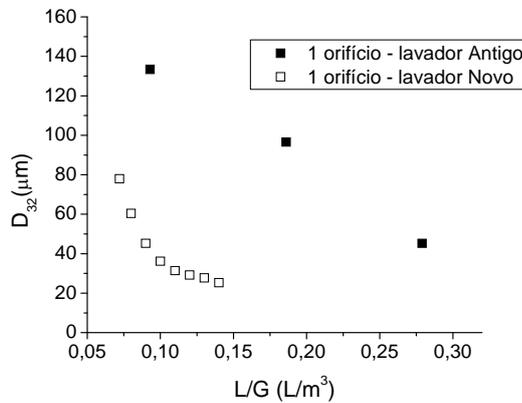


Figura C2- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 64 \text{ m/s}$ x = 180 mm.

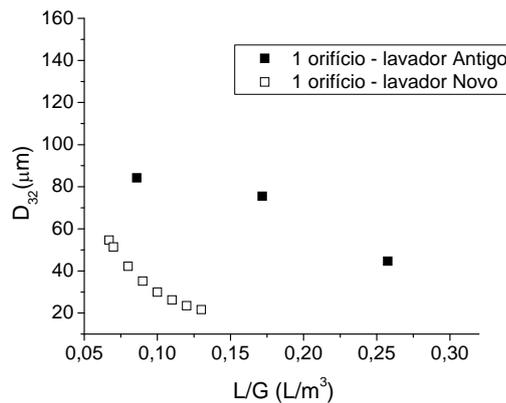


Figura C3- Comparação entre o diâmetro médio de Sauter para a injeção através de 1 orifício medidas no lavador Venturi dos testes preliminares e as medidas no novo lavador. $V_g = 69 \text{ m/s}$ x = 240 mm.

APÊNDICE D

Análise dimensional baseada no teorema de Buckingham Pi.

Através dos experimentos realizados para medição de tamanhos de gotas na garganta do lavador constatou-se que no processo de geração de gotas o diâmetro de Sauter é uma função das propriedades e variáveis abaixo listadas.

$$D_{32} = f(d_o, V_j, \mu_l, \rho_l, \sigma, 2R_{eq}, V_g, \mu_g, \rho_g, x)$$

Onde: D_{32} [L] é o tamanho da gota, d_o [L] é o diâmetro do orifício, x [L] é a distância axial partindo o ponto de injeção do líquido, V_j [L/t] é a velocidade do jato, V_g [L/t] é a velocidade do gás na garganta do lavador, σ [L/t²] é a tensão superficial do líquido, μ_l [M/Lt] é a viscosidade do líquido, μ_g [M/Lt] viscosidade do gás, ρ_l [M/L³] é a densidade do líquido, ρ_g [M/L³] é a densidade do gás e $2R_{eq}$ [L] é o parâmetro de posicionamento dos orifícios de injeção do líquido.

Pelas unidades existem três parâmetros dimensionais que se repetem: L (comprimento), t (tempo), e M (massa).

Número de $\pi = 11 - 3 = 8$

Da lista contendo dez parâmetros, listadas acima, três delas foram determinadas como parâmetros básicos de repetição: d_o , V_g e ρ_g .

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) = 0 \quad (D1)$$

Onde:

$$\Pi_1 = D_{32} \cdot d_o^{a1} \cdot V_g^{b1} \cdot \rho_g^{c1} \quad (D2)$$

$$\Pi_2 = V_j \cdot d_o^{a2} \cdot V_g^{b2} \cdot \rho_g^{c2} \quad (D3)$$

$$\Pi_3 = \mu_l \cdot d_o^{a3} \cdot V_g^{b3} \cdot \rho_g^{c3} \quad (D4)$$

$$\Pi_4 = \rho_l \cdot d_o^{a4} \cdot V_g^{b4} \cdot \rho_g^{c4} \quad (D5)$$

$$\Pi_5 = \sigma \cdot d_o^{a5} \cdot V_g^{b5} \cdot \rho_g^{c5} \quad (D6)$$

$$\Pi_6 = 2R_{eq} \cdot d_o^{a6} \cdot V_g^{b6} \cdot \rho_g^{c6} \quad (D7)$$

$$\Pi_7 = \mu_g \cdot d_o^{a7} \cdot V_g^{b7} \cdot \rho_g^{c7} \quad (D8)$$

$$\Pi_8 = x \cdot d_o^{a8} \cdot V_g^{b8} \cdot \rho_g^{c8} \quad (D9)$$

Pela análise dimensional pode-se encontrar os valores dos expoentes a, b e c para cada Π . Desta forma:

$$\Pi_1 = \frac{D_{32}}{d_o} \quad (D10)$$

$$\Pi_2 = \frac{V_j}{V_g} \quad (D11)$$

$$\Pi_3 = \frac{d_o \cdot V_g \cdot \rho_g}{\mu_l} \quad (D12)$$

$$\Pi_4 = \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (D13)$$

$$\Pi_5 = \frac{d_o \cdot V_g^2 \cdot \rho_g}{\sigma} = We_g \quad (D14)$$

$$\Pi_6 = \frac{2R_{eq}}{d_o} \quad (D15)$$

$$\Pi_7 = \frac{d_o \cdot V_g \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (D16)$$

$$\Pi_8 = \frac{x}{d_o} \quad (D17)$$

Rearranjando tem-se:

$$\Pi_3' = \Pi_3 \cdot \Pi_2 \cdot \Pi_4 = \frac{d_o \cdot V_j \cdot \rho_l}{\mu_l} = Re_l \quad (D18)$$

Por conveniência o d_o foi substituído pelo D_h (diâmetro hidráulico da garganta do lavador) nos parâmetros Π_6 , Π_7 e Π_8 .

Desta forma:

$$\Pi_6' = \frac{2R_{eq}}{D_h} \quad (D19)$$

$$\Pi_7' = \frac{D_h \cdot V_g \cdot \rho_g}{\mu_g} = Re_g \quad (D20)$$

$$\Pi_8' = \frac{x}{D_h} \quad (D21)$$

Com Π s estabelecidos a razão D_{32}/d_o é expressa em função dos números de Reynolds do líquido e do gás, do número de Weber, da razão x/D_h e $2R_{eq}/D_h$. Desta forma tem-se:

$$\frac{D_{32}}{d_o} = A \cdot Re_l^B \cdot We_g^C \cdot Re_g^D \cdot \left(\frac{x}{D_h}\right)^E \cdot \left(\frac{2R_{eq}}{D_h}\right)^F$$

Onde A, B, C, D, E e F são constantes que foram estabelecidas usando o método dos mínimos quadrados. Para ajustar os valores das constantes foi utilizado o Solver do programa Excel. Os valores foram ajustados de modo a minimizar a diferença entre o resultado estimado pela correlação e o dado experimental, sendo a diferença entre eles elevada ao quadrado.

Os valores das propriedades do líquido e do gás podem ser vistos na Tabela D1 para a temperatura de 25⁰C.

Tabela D1: Valores das propriedades físicas utilizados nas equações 4.4 e 4.5.

$\rho_l(\text{Kg/m}^3)$	$\mu_l(\text{Ns/m}^2)$	$\sigma(\text{n/m})$	$\rho_g(\text{Kg/m}^3)$	$\mu_g(\text{Ns/m}^2)$
997,07	8,90E-04	0,07197	1,184	1,84E-05